

ANEXO A INFORME TECNICO REVISIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO

Centro de Ecología Aplicada Ltda.

Junio, 2013





CLIENTE AES GENER

CONTRATO Nº -

NOMBRE DEL CONTRATO

TITULO DEL INFORME FINAL REVISIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL

DOCUMENTO PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO

Rev.	Fecha	Preparó	Revisó	Aprobó
0	14/06/2013	Manuel Contreras (Biólogo PhD Ecología) Toradji Uraoka (Ing. Civil Hidráulico) Felipe Sandoval (Ing. Civil Hidráulico MSc) Claudia Mellado (Ing. Civil Hidráulico MSc) Patricio Pastenes (Ing. Civil Hidráulico) Karla González (Ing. Civil Hidráulico MSc) Con Potencial Consultores	Manuel Contreras (Biólogo PhD Ecología) Toradji Uraoka (Ing. Civil Hidráulico) Carlos Reiher (Ing. Civil Hidráulico MSc)	Manuel Contreras (Biólogo PhD Ecología) Toradji Uraoka (Ing. Civil Hidráulico)



RESUMEN EJECUTIVO

Durante el Due Diligence realizado por los Bancos multilaterales en el marco del análisis para el financiamiento del Proyecto, y a requerimiento de éstos, se revisaron los resultados obtenidos en el estudio de caudal ecológico de 2008 (CEA, 2008). La revisión realizada arrojó las siguientes observaciones:

- Respecto al sistema de representación fluvial, incorporar nuevas secciones topobatimétricas que responden al requerimiento de describir detalladamente las AIA estudiadas. De forma simultánea, se realizar mediciones de velocidad del flujo, obteniendo una mejor descripción del microhábitat del río/estero.
- Para la caracterización hidrológica, incorporar estadísticas a escala diaria, principalmente para responder a una mejor descripción de los caudales de estiaje. En cuanto al rendimiento del aporte intermedio de la cuenca, considerar la recarga de estiaje (menor caudal mensual en curva de variación estacional de probabilidad de excedencia 85%). Realizar un estudio de estacionalidad de caudales para evaluar la tendencia de la serie hidrológica.
- En cuanto a la simulación hidráulica, incorporar el efecto de la rugosidad en la profundidad y velocidad, mediante un análisis y calibración que considera el efecto macrorrugoso del escurrimiento dependiendo de la magnitud del caudal.
- Dentro de los criterios de idoneidad de hábitat, agregar macroinvertebrados acuáticos como especies de relevancia ecológica, y incorporar la variable sustrato en la evaluación eco-hidráulica.
- Para la modelación eco-hidráulica y cuantificación de hábitat de las especies, utilizar el programa PHABSIM, atendiendo a las exigencias de utilización de un software especialmente diseñado para ello.

Para abordan las observaciones planteadas durante el Due Diligence, se realizó una actualización de la línea de base ambiental y la implementación de una metodología de uso internacional (IFIM/PHABSIM). Ambos elementos permitieron obtener resultados actualizados sobre el hábitat de las especies de relevancia ecológica, y con ello verificar los caudales ecológicos asociados al proyecto establecidos por la Dirección General de Aguas (DGA).

Las Áreas de Importancia Ambiental que fueron analizadas correspondieron a las siguientes: Lajas, Toyo, San Alfonso, Alfalfal, Colorado, Volcán, Yeso, Morado, Engorda, Placas y Colina.

Para complementar la información topobatimétrica y la obtención de mediciones de flujo, se realizaron 88 nuevos perfiles y la medición simultánea de aforos en cada uno de estos.

Para complementar la información ambiental se realizaron 3 campañas de monitoreo durante 2012 (septiembre y diciembre) y 2013 (marzo), donde se caracterizó la calidad de

agua, flora y fauna acuática, avifauna y fauna terrestre asociada a los cursos de agua (CEA, 2013b).

En la evaluación de usos antrópicos de rafting/kayak, se consideró un ancho efectivo (continuo) de 12 m, con la profundidad de 60 cm. Se agregó un análisis para condiciones mínimas en la cual se podría desarrollar la práctica de rafting.

Los principales resultados obtenidos se detallan a continuación:

Por un lado, fue posible incorporar información levantada especialmente para incrementar la resolución espacial y temporal de los análisis originales. Por otro lado, se adoptaron cambios metodológicos en la evaluación hidráulica y eco-hidráulica, al implementar modelos combinados de HECRAS y PHABSIM. Ambos elementos permitieron obtener resultados sobre el hábitat de las especies de relevancia ecológica y con ello verificar los caudales ecológicos asociados al proyecto establecidos por la Dirección General de Aguas (DGA).

Resultados modelación hidráulica

Se verificó una relación potencial decreciente entre el caudal y el coeficiente de Manning, lo que es esperado, toda vez que la macrorugosidad del flujo aumenta a medida que disminuye la altura de escurrimiento, debido al aumento de la relación Rh/ds, alcanzándose máximos del coeficiente de Manning del orden de 0.1 s/m^{1/3}, obteniéndose estos normalmente para caudales pequeños, dentro del rango evaluado.

Las pendientes medias de los tramos del río Maipo y Colorado fueron del orden de 1% - 2%, mientras que en los esteros varió entre 2% y 4%. De acuerdo a Montgomery y Buffington (1997, ver Figura 12 de dicho estudio), de una serie de cauces evaluados, el coeficiente de Manning para ríos con pendientes en el rango 1% - 4% se concentró entre 0.05 s/m^{1/3} y 0.09 s/m^{1/3}, con valores extremos en 0.04 s/m^{1/3} y 0.1 s/m^{1/3} aproximadamente. Así, comparativamente los valores máximos obtenidos para el coeficiente de Manning en las 11 AIA se ubicaron dentro del rango esperado definido en el citado estudio.

Hubo excepciones a la tendencia decreciente de la relación Q v/s n en esteros de bajo escurrimiento, en los que para caudales bajos, los niveles fueron inferiores al tamaño característico del sedimento grueso. En estos casos, para los caudales mínimos, la relación Q v/s n fue creciente.

Cabe destacar que fue considerado un valor de Δn invariable con el caudal. La medición de la altura de escurrimiento en cada tramo modelado, para una condición de flujo diferente, permitiría verificar la relación obtenida. Al respecto, se recomienda realizar nuevas mediciones en aguas bajas en las diferentes AIA (salvo en el caso de las Placas) y en aguas medias/altas a lo menos en los esteros las Placas y Engorda.

Resultados modelación del hábitat

Los resultados de la modelación del hábitat en los ríos Maipo y Colorado indican que la mayoría de las especies de fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos evaluadas



(72%) se encuentran en una condición subóptima (condición sin proyecto), si se consideran los escenarios de caudal comprendidos entre los mínimos históricos y promedio registrados actualmente por el río. Por otra parte y a diferencia de lo anterior, los resultados para los ríos Yeso, Volcán, y los esteros Placas, Colina, Morado y Engorda, indican que las condiciones de hábitat óptimo para las especies evaluadas sí han ocurrido en condiciones actuales.

Respecto a los resultados para fauna íctica, se verificó una mejor condición de hábitat para los salmónidos *S. trutta* y *O. mykiss* respecto a la especie nativa *T. areolatus*, lo cual es consistente con los resultados de línea base, donde las especies salmonídeas introducidas son las más representativas del área de estudio, en términos espaciales y de abundancia (CEA, 2013).

En cuanto a los resultados para macroinvertebrados bentónicos se observó una mayor disponibilidad de hábitat potencialmente útil respecto a la fauna íctica, así como una mejor condición de hábitat para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y Plecoptera, lo cual es consistente con lo observado en los registros de línea base sobre abundancia de zoobentos.

Adicionalmente y sobre las características del hábitat potencialmente útil, el análisis de sensibilidad realizado utilizando un umbral de corte (CFmin = 0.5), mostró que la calidad del hábitat en el área de estudio es baja.

Resultados caudal ecológico antrópico

Fueron evaluadas las condiciones para realizar la actividad de descenso en kayak/rafting en las AIA San Alfonso y Toyo, considerándose condiciones mínimas (ancho de 7.5 m y profundidad de 20 cm) y medias (ancho de 12 m y profundidad de 60 cm).

La evaluación de requerimientos mínimos estimó caudales ecológicos asociados de 4.889 m³/s y 6.74 m³/s en las AIA Toyo y San Alfonso, respectivamente. Cabe destacar que para ambos casos, los caudales medios mensuales para un año seco permiten cumplir con tales requerimientos durante el período evaluado (octubre – abril).

La evaluación de requerimientos medios estimó caudales ecológicos asociados de 33 m³/s y 54 m³/s en las AIA Toyo y San Alfonso, respectivamente.

En el caso del AIA Toyo, el caudal ecológico es inferior al caudal medio mensual de todos los meses del período octubre — abril para un año seco (Q_{85}) , salvo para el mes de abril.

En el caso del AIA San Alfonso, el caudal ecológico es inferior al caudal medio mensual de un año seco solamente para el período noviembre – febrero. En el caso de marzo y octubre, en un año normal el caudal sería suficiente para sustentar la práctica de la actividad. En abril, en tanto, se requiere un caudal intermedio entre el Q_{50} y el Q_{15} .

Comparación entre situación sin y con proyecto

Se evaluó la variación respecto de la situación actual de las diferentes AIA en términos del caudal, altura de escurrimiento y habitabilidad, por efecto de la operación del proyecto.



Para la evaluación fue considerada la condición de estiaje. Los resultados de esta evaluación se presentan en la siguiente **Tabla 1**.

Tabla 1 Porcentaje de cambio del hábitat ponderado útil para una condición con proyecto en relación a una condición sin proyecto (WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto -100%).

		CAMBIO CAUDAL (%)	CAMBIO ALTURA (%)	CAMBIO HABITAT WUA Qeco Con Proyecto /Q Sin proyecto -100 (%)								
N°	AIA	q	h medio	St adulto	St juvenil	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil	E	Т	Р
1	Lajas	-28%	-10%	18%	31%	18%	9%	45%	-26%	24%	28%	24%
2	El Toyo	-6%	-4%			-4%	1%	-1%	2%	2%	6%	5%
3	San Alfonso	-6%	-2%	3%	4%					3%	-2%	3%
4	Colorado- Alfalfal	-65%	-29%							26%		
5	Colorado- Maitenes	-54%	-24%			217%	92%	94%	84%		152%	224%
6	Yeso	-18%	-3%	-1%	-5%					5%	6%	-2%
7	Volcán	-14%	-3%							5%	5%	3%
8	Colina	-46%	-21%							-4%	-2%	
9	Morado	-47%	-23%							-5%	-3%	-26%
10	Placas	0%	0%							0%	0%	0%
11	Engorda	-20%	-11%							3%	1%	

En términos de cambio de altura, las mayores variaciones se darían en cuerpos de agua afectados directamente por el proyecto (es decir, ríos o esteros que consideran la instalación de bocatomas). Cabe destacar que las AIA Lajas y Yeso correspondieron a las excepciones a lo señalado anteriormente (el río Yeso, pese a la bocatoma proyectada, vería un descenso de solamente un 3% en su altura media). El estero las Placas no vería modificado su caudal para una condición de estiaje, ya que este sería menor al caudal ecológico.

Respecto al cambio de hábitat, los resultados indican que en las AIA Colorado en Alfalfal, Colorado en Maitenes, Volcán y Engorda, la implementación del proyecto implica una mayor cantidad de hábitat ponderado disponible respecto a la situación sin proyecto. Estas ganancias de hábitat son poco significativas para las AIA Engorda y Volcán (entre +1% y +5%), y de mayor cuantía para las AIA Alfalfal (+26%) y Maitenes (+92% a +224%). El estero las Placas no vería modificado su caudal para una condición de estiaje, por lo tanto no experimentaría variación del hábitat.

En el caso de las AIA Colina y Morado, la implementación del proyecto se traduce en una pérdida de hábitat para todas las especies en evaluación, en su mayoría en torno al -5%, a excepción del orden Plecoptera en la AIA Morado, donde la disminución de hábitat ponderado es de -26%.



INDICE DE CONTENIDOS

RESU	MEN EJECUTIVO	3
<u>1.</u>	INTRODUCCIÓN	11
<u>2.</u>	OBJETIVOS	11
<u>3.</u>	METODOLOGÍA	12
3.1	SISTEMA DE REPRESENTACIÓN FLUVIAL	12
3.1.1	ZONIFICACIÓN	12
3.1.2	LEVANTAMIENTO DE NUEVOS PERFILES TOPOBATIMÉTRICOS	12
3.1.3	MEDICIÓN DE AFOROS EN NUEVOS PERFILES TOPOBATIMÉTRICOS.	14
3.2	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	15
3.2.1	ESTADÍSTICAS HIDROLÓGICAS DIARIAS Y CAUDALES CARACTERÍSTICOS	15
3.2.2	CAUDALES DE ESTIAJE	16
3.2.3	RECARGA DE TRAMOS INTERMEDIOS	17
3.2.4	Análisis de Estacionalidad	21
3.3	SIMULACIÓN HIDRÁULICA	22
3.3.1	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO	22
3.3.2	Proceso de calibración	25
3.3.3	Modelación para serie de caudales	27
3.3.4	DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DE LA VELOCIDAD	28
3.3.5	GENERACIÓN MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD EN PHABSIM	31
3.4	CRITERIOS DE IDONEIDAD DE HÁBITAT	34
3.4.1	ACTUALIZACIÓN DE LA LÍNEA BASE DE LA COMPONENTE BIOLÓGICA	34
3.4.2	CURVAS DE PREFERENCIA ASOCIADAS A LAS DISTINTAS ESPECIES	40
3.5	EVALUACIÓN PHABSIM	47
3.5.1	Modelación del hábitat	47
3.5.2	REPRESENTACIÓN DE AIA EN PHABSIM	47
3.5.3	DETERMINACIÓN DEL HÁBITAT PONDERADO ÚTIL (WUA)	49
3.6	USOS ANTRÓPICOS	51
3.6.1	Criterios de evaluación	51
3.7	RESULTADOS MODELACIÓN DE HÁBITAT	52
<u>4.</u>	RESULTADOS	54
4.1	HIDROLOGÍA EN ÁREAS DE IMPORTANCIA AMBIENTAL	54
4.1.1	AIA LAJAS	54



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

4.1.2	AIA Toyo	55
4.1.3	AIA San Alfonso	57
4.1.4	AIA ALFALFAL	58
4.1.5	AIA MAITENES	60
4.1.6	AIA YESO	61
4.1.7	AIA VOLCÁN	62
4.1.8	AIA COLINA	64
4.1.9	AIA MORADO	65
4.1.10	AIA PLACAS	66
4.1.11	AIA ENGORDA	67
4.2	RESULTADOS ANÁLISIS DE ESTACIONARIEDAD	68
4.3	CALIBRACIÓN COEFICIENTE DE MANNING	69
4.3.1	AIA LAJAS	69
4.3.2	AIA Toyo	72
4.3.3	AIA SAN ALFONSO	76
4.3.4	AIA ALFALFAL	81
4.3.5	AIA MAITENES	84
4.3.6	AIA YESO	88
4.3.7	AIA VOLCÁN	91
4.3.8	AIA COLINA	95
4.3.9	AIA Morado	98
4.3.10	AIA PLACAS	101
4.3.11	AIA ENGORDA	106
4.4	Modelación hidráulica. Relación Q $_{v/s}$ n y Q $_{v/s}$ h.	109
4.4.1	AIA LAJAS	109
4.4.2	AIA Toyo	112
4.4.3	AIA SAN ALFONSO	116
4.4.4	AIA ALFALFAL	119
4.4.5	AIA MAITENES	121
4.4.6	AIA YESO	123
4.4.7	AIA Volcán	125
4.4.8	AIA COLINA	127
4.4.9	AIA MORADO	129
4.4.10	AIA PLACAS	131
4.4.11	AIA ENGORDA	133
4.5	MODELACIÓN HIDRÁULICA. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.	135
4.5.1	AIA LAJAS	135
4.5.2	AIA Toyo	138
4.5.3	AIA SAN ALFONSO	142
4.5.4	AIA ALFALFAL	145
4.5.5	AIA MAITENES	147



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

6.	REFERENCIAS	261
5.3	CAUDAL ECOLÓGICO ANTRÓPICO	260
5.2	MODELACIÓN DEL HÁBITAT	258
5.1.4	RESULTADOS MODELACIÓN, DISTRIBUCIÓN VELOCIDAD	257
5.1.3	RESULTADOS MODELACIÓN, RELACIÓN Q V/S N Y H V/S N.	256
5.1.2	RESULTADOS CALIBRACIÓN	255
	DE MODELO HIDRÁULICO.	255
5.1.1	EFECTOS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS CUERPOS DE AGUA EVALUADOS EN SU REPRES	SENTACIÓN POR
5.1	Modelación hidráulica	255
_		
<u>5.</u>	CONCLUSIONES	254
4.8.3	EFECTOS SOBRE EL HÁBITAT	250
4.8.2	EFECTOS SOBRE LA COTA DE AGUA	247
4.8.1	EFECTOS SOBRE LOS CAUDALES	239
4.8	COMPARACIÓN ENTRE SITUACIÓN SIN Y CON PROYECTO	239
4.7.3	AIA SAN ALFONSO	234
4.7.2	AIA Toyo	230
4.7.1	AIA LAJAS	230
4.7	Modelación hidráulica. Caudal ecológico actividades antrópicas.	230
4.6.12		228
4.6.11		223
4.6.10		218
4.6.9	AIA MORADO	213
4.6.8	AIA COLINA	208
4.6.7	AIA VOLCÁN	204
4.6.6	AIA YESO	199
4.6.5	AIA COLORADO EN ALTALIAL AIA COLORADO EN MAITENES	192
4.6.4	AIA COLORADO EN ALFALFAL	190
4.6.3	AIA SAN ALFONSO	184
4.6.2	AIA TOYO	179
4.6.1	AIA LAIAS	169
4.5.11 4.6	Modelación del hábitat	169
4.5.10		163 165
4.5.9 4.5.10	AIA MORADO AIA PLACAS	161
4.5.8	AIA Managa	157
4.5.7	AIA VOLCÁN	154
4.5.6	AIA YESO	150



LISTADO DE ANEXOS

- I INFORMACIÓN BASE TOPOBATIMÉTRICA, AFOROS Y FOTOGRAFÍAS
- II PERFILES TOPOBATIMÉTRICOS Y PERFILES DE VELOCIDAD PROCESADOS
- III HIDROLOGÍA
 - III.1 INFORMES HIDRÓLÓGICOS
 - III.2 CAUDALES ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA MAIPO EN SAN ALFONSO
 - III.3 SERIES HIDROLÓGICAS (PLANILLAS DE CÁLCULO)
 - III.4 ANÁLISIS DE ESTACIONARIEDAD
- IV MODELACIÓN HIDRÁULICA
 - IV.1 CAUDALES MODELADOS
 - IV.2 RESULTADOS Q, N, H
 - IV.3 RESULTADOS PERFIL DE VELOCIDAD (COEFICIENTE VAF-PHABSIM)
- V MODELACIÓN HÁBITAT
 - V.1 RESULTADOS LÍNEA BASE PECES Y ZOOBENTOS
 - V.2 CURVAS DE HABITABILIDAD
 - V.3 RESULTADOS HÁBITAT PONDERADO ÚTIL (WUA)



1. INTRODUCCIÓN

La compañía AES GENER, en el contexto del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), solicitó una revisión del Estudio de Caudal Ecológico (ECE) realizado por el Centro de Ecología Aplicada (CEA) durante el año 2008. La revisión se realizó sobre la base de las observaciones emanadas durante el Due Diligence realizado por los Bancos multilaterales en el marco del análisis para el financiamiento del Proyecto.

Para abordan las observaciones planteadas durante el Due Diligence, se realizó una actualización de la línea de base ambiental y la implementación de una metodología de uso internacional (IFIM/PHABSIM). Ambos elementos permitieron obtener resultados actualizados sobre el hábitat de las especies de relevancia ecológica y con ello verificar los caudales ecológicos asociados al proyecto, establecidos por la Dirección General de Aguas (DGA).

En este informe se presentan los resultados del río Maipo en las Áreas de Importancia Ambiental (AIA) de San Alfonso, El Toyo y Las Lajas, río Colorado en las AIA Alfalfal y Colorado bajo Maitenes, río Yeso en AIA Yeso, río Volcán en AIA Volcán y en los esteros Morado, Placas, Engorda y Colina en las respectivas AIA del mismo nombre.

2. OBJETIVOS

Elaborar un informe que considere las observaciones emanadas durante el Due Diligence realizado por los Bancos multilaterales en el marco del análisis para el financiamiento del Proyecto.

Lo anterior, considerando la legislación aplicable en Chile y la información existente en cuanto a los aspectos hidrológicos, morfológicos, hidráulicos y ecológicos en el área de estudio.



3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para la revisión del caudal ecológico de los cuerpos de agua influenciados por el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo incorpora la realización de una serie de actividades de generación de información complementaria, la que permitió actualizar y/o incrementar la resolución de la información considerada para el estudio original (CEA, 2008). Las actividades correspondieron a la actualización de la línea base de la componente biológica, hidrología a nivel diario, el levantamiento de nuevos perfiles topobatimétricos y a la medición de aforos asociados a los perfiles mencionados. La información permitió implementar un modelo hidráulico, y sus resultados suministraron la información para efectuar la evaluación ecohidráulica con el modelo PHABSIM (Physical Habitat Simulation).

3.1 Sistema de representación fluvial

3.1.1 Zonificación

Se realizó una priorización de las 21 AIA identificadas en el estudio de caudal ecológico del 2008, definiéndose un total de 11 en las cuáles será reevaluado el caudal ecológico (**Figura 1**). La priorización de las AIA fue realizada en función de su distribución espacial sus características morfológicas, los usos antrópicos y la presencia de especies ícticas. Así, en la selección quedaron incluidas a lo menos una AIA por cuerpo de agua, todas las AIA que presentaron presencia de fauna íctica nativa en el Estudio de Caudal Ecológico del PHAM (CEA, 2008) y el tramo más característico del rafting realizado en el río Maipo.

3.1.2 Levantamiento de nuevos perfiles topobatimétricos

En cada una de las 11 AIA fueron solicitados 8 perfiles transversales con aforos simultáneos, de modo de obtener una alta resolución de perfiles, que permitieran obtener una calibración y modelación del eje hidráulico representativa de cada tramo evaluado. La única excepción a los 8 perfiles correspondió al sector del Toyo, en el que fueron solicitados 10 perfiles. La extensión total de los tramos varió entre alrededor de 40 m y 350 m, aproximadamente. Cabe señalar que de los perfiles solicitados, hubo 3 que no pudieron ser realizados por los encargados en el sector de San Alfonso, debido a que las condiciones locales no lo permitieron (Ver **Tabla 2** y **Anexo I**).

El número total de perfiles medidos por cada AIA seleccionada, la extensión del tramo y la ubicación de cada AIA se presentan en la **Tabla 2** En los **Anexos I y II** se presenta un resumen tabulado de todos los perfiles medidos, junto con figuras de las secciones transversales.

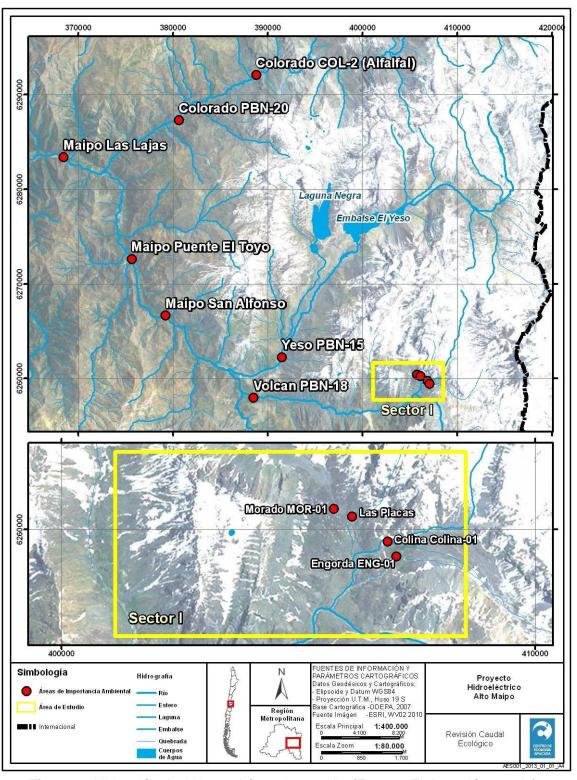


Figura 1. Ubicación de AIA en el área de estudio (Fuente: Elaboración propia).



Tabla 2.- Perfiles topobatimétricos medidos (Fuente: Elaboración propia).

Río/estero	AIA	# perfiles	Extensión	Coordenadas Datum WGS84 (huso 19)		
			tramo (m)	E (UTM)	N (UTM)	
Engorda	Engorda (ENG01)	8	39	407070	6259435	
Colina	Colina (COLINA01)	9	59	406880	6259742	
Morado	Morado (MOR1)	8	73	405750	6260441	
Placas	Placas (PLACAS-01)	8	59	406130	6260277	
Volcán	Volcán (PBN-18)	8	129	388492	6257984	
Yeso	Yeso (PBN-15)	8	175	391473	6262279	
Colorado	Alfalfal (COL-2)	8	151	388776	6292084	
Colorado	Maitenes (PBN-20)	8	171	380592	6287281	
	San Alfonso (PBN-05)	5	163	379179	6266649	
Maipo	Toyo (TOYO)	10	342	375635	6272634	
	Lajas (Lajas2)	8	311	368432	6283371	

3.1.3 Medición de aforos en nuevos perfiles topobatimétricos.

Junto con los perfiles topobatimétricos, fue implementada la medición de aforos en cada uno de estos. El objetivo fue determinar el caudal con el que sería realizada la calibración del eje hidráulico, además de generar perfiles transversales de la velocidad del flujo en cada perfil topobatimétrico, para su aplicación, por medio del método 1-VEL, en la determinación de la cantidad de hábitat con PHABSIM. Cabe señalar que por temas de seguridad, debido a la alta velocidad del flujo, no fue posible realizar aforos en todos los perfiles topobatimétricos, fundamentalmente en los ríos Maipo y Colorado. El número de aforos realizados en cada tramo, se presenta en la **Tabla 3**. El detalle de los aforos se presenta en el **Anexo I**.

Tabla 3.- Resumen aforos realizados (Fuente: Elaboración propia).

Río/estero	AIA	# aforos	Perfil (es) aforado (s)
Engorda	Engorda (ENG01)	8	1 – 8
Colina	Colina (COLINA01)	7	1-3 y 5-8
Morado	Morado (MOR1)	8	1 – 8
Placas	Placas (PLACAS-01)	8	1 – 8
Volcán	Volcán (PBN-18)	8	1 – 8
Yeso	Yeso (PBN-15)	8	1 – 8
Colorado	Alfalfal (COL-2)	8	1 – 8
Colorado	Maitenes (PBN-20)	1	2
	San Alfonso (PBN-05)	2	7 - 8
Maipo	Toyo (TOYO)	3	1; 9 - 10
	Lajas (Lajas2)	7	2 - 8

3.2 Caracterización hidrológica

3.2.1 Estadísticas hidrológicas diarias y caudales característicos

Las series hidrológicas consideradas en el informe de Estudio de Caudal Ecológico del PHAM fueron actualizadas, extendiéndose al período comprendido entre el 1 de enero de 1965 y el 31 de julio de 2009. En conjunto con la actualización, las series fueron desarrolladas a escala diaria, a diferencia del estudio mencionado en el cual se encontraban a escala mensual, siendo obtenidas de APR Ingeniería S.A (S/Aa).

En la **Tabla 4** se resume la ubicación de los puntos donde fueron generadas las series hidrológicas. Además de los puntos incluidos en esta, se debe destacar que existen series hidrológicas en las siguientes estaciones fluviométricas, ubicadas en los ríos Maipo, Colorado, Volcán y Olivares. Estas series fueron utilizadas para la generación de las series sintéticas y, con la excepción de la estación de río Olivares y de Colorado antes de junta con río Olivares, fueron extendidas mediante relleno de datos al período 1 de enero de 1965 y 31 de julio de 2009:

- Río Maipo en el Manzano
- Río Maipo en San Alfonso
- Río Maipo en las Melosas
- Río Colorado antes de junta con río Maipo
- Río Volcán en Queltehues
- Río Colorado antes de junta con Olivares
- Río Olivares antes de junta con Colorado

En la **Figura 2** se presenta la extensión de la estadística de los caudales medios diarios en las estaciones fluviométricas.

Adicionalmente al señalado, fueron además considerados los siguientes estudios para caracterizar condiciones medias mensuales en diferentes tramos para años seco, normal y húmedo:

- "Estudios Hidrológicos especiales para re-análisis de caudales ecológicos y evaluación del efecto del cambio climático sobre la disponibilidad futura de recursos hídricos", Partes I y II (APR Ingeniería S.A, 2013a y b, respectivamente).
- "Balance Hídrico de la Hoya del Río Maipo Informe Final (CONIF-BF Ingenieros consultores, 2008).

CENTRO DE EDUCADA ANTIGUA DE ANTI

Tabla 4.- Ubicación series hidrológicas (Fuente: APR Ingeniería, S/Aa.).

Subsistema	Cauce	Sección		
	Estero El Morado	Estero El Morado aguas abajo bocatoma		
	Estero El Morado	Estero El Morado aguas arriba confluencia con Las Placas		
	Estero Las Placas	Qda. Las Placas aguas abajo bocatoma PHAM		
	Listero Las Flacas	Qda. Las Placas aguas arriba confluencia con estero El Morado		
	Estero El Morado	Estero El Morado aguas abajo confluencia Qda. Las Placas		
Volcán	Estero El Morado	Estero El Morado aguas arriba confluencia con estero Colina		
	Estero Colina	Estero El Morado aguas abajo bocatoma Estero El Morado aguas arriba confluencia con Las Placas Qda. Las Placas aguas abajo bocatoma PHAM Qda. Las Placas aguas arriba confluencia con estero El Morado Estero El Morado aguas arriba confluencia Qda. Las Placas Estero El Morado aguas arriba confluencia con estero Colina Estero Colina aguas abajo bocatoma PHAM Estero Colina aguas arriba confluencia con Estero El Morado Estero El Morado aguas abajo bocatoma PHAM Estero Colina aguas arriba confluencia estero Colina Estero La Engorda aguas abajo bocatoma PHAM Río Volcán aguas arriba confluencia con río Maipo Maipo aguas arriba Junta Volcán Maipo aguas abajo Junta Volcán Yeso aguas abajo bocatoma Yeso Yeso aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas arriba Junta Yeso Colorado aguas arriba Junta Yeso Colorado aguas arriba bocatoma Maitenes Colorado aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas arriba Junta Colorado Maipo aguas arriba Junta Colorado Maipo aguas arriba descarga Las Lajas Maipo aguas abajo descarga Las Lajas		
	Estero Colina	Estero Colina aguas arriba confluencia con Estero El Morado		
	Estero El Morado	Estero El Morado aguas abajo confluencia estero Colina		
Estero La Engorda		Estero La Engorda aguas abajo bocatoma PHAM		
	Rio Volcán antes junta con río Maipo	Río Volcán aguas arriba confluencia con río Maipo		
Maipo Maipo		Maipo aguas arriba Junta Volcán		
Iviaipo	ivialpo	Maipo aguas abajo Junta Volcán		
Yeso	Yeso	Yeso aguas abajo bocatoma Yeso		
reso	reso	Maipo aguas arriba Junta Volcán Maipo aguas abajo Junta Volcán Yeso aguas abajo bocatoma Yeso Yeso aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas arriba Junta Yeso		
Maipo	Maina	Maipo aguas arriba Junta Yeso		
Iviaipo	Maipo	Maipo aguas abajo Junta Yeso		
		Colorado aguas arriba bocatoma Maitenes		
Colorado	Colorado	Colorado aguas abajo bocatoma Maitenes		
		Colorado aguas arriba confluencia Maipo		
		Maipo aguas arriba Junta Colorado		
		Maipo aguas abajo Junta Colorado		
Maipo	Maipo	orado Colorado aguas abajo bocatoma Maitenes Colorado aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas arriba Junta Colorado Maipo aguas abajo Junta Colorado Maipo aguas arriba descarga Las Lajas		
		Qda. Las Placas aguas abajo bocatoma PHAM Qda. Las Placas aguas arriba confluencia con estero El Morado Estero El Morado aguas abajo confluencia Qda. Las Placas Estero El Morado aguas arriba confluencia con estero Colina Estero Colina aguas abajo bocatoma PHAM Estero Colina aguas arriba confluencia con Estero El Morado Estero El Morado aguas abajo bocatoma PHAM Estero La Engorda aguas abajo bocatoma PHAM Río Volcán aguas arriba confluencia con río Maipo Maipo aguas arriba Junta Volcán Maipo aguas abajo Junta Volcán Yeso aguas abajo bocatoma Yeso Yeso aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas arriba Junta Yeso Colorado aguas arriba bocatoma Maitenes Colorado aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas abajo bocatoma Maitenes Colorado aguas arriba confluencia Maipo Maipo aguas arriba Junta Colorado Maipo aguas arriba Junta Colorado Maipo aguas arriba descarga Las Lajas		
		Maipo aguas abajo descarga Las Lajas		

Estación	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
RÍO MAIPO EN EL MANZANO							
RÍO MAIPO EN SAN ALFONSO							
RÍO MAIPO EN LAS MELOSAS							
RÍO COLORADO A/J MAIPO							
RÍO COLORADO A/J OLIVARES							
RÍO OLIVARES A/J COLORADO							
RÍO VOLCÁN EN QUELTEHUES							

Figura 2.- Extensión información series hidrológicas (Fuente: APR Ingeniería, S/Aa.).

3.2.2 Caudales de estiaje

Con la información de las series hidrológicas actualizadas, fueron calculados diferentes estadísticas hidrológicas, asociadas a condiciones de estiaje. Los caudales definidos se presentan en la **Tabla 5.**



Tabla 5.- Caudales hidrológicos para condiciones de estiaje evaluados (Fuente: Elaboración propia).

Caudal característico
10% caudal medio anual
Q medio mensual mínimo
Q medio mensual con 85% de probabilidad de excedencia
Q medio mensual con 15% de probabilidad de excedencia
Q7 (caudal mínimo de 7 días consecutivos).
Q10 (caudal mínimo de 10 días consecutivos).
Q330 (Caudal excedido 330 días al año)
Q347 (Caudal excedido 347 días al año)

3.2.3 Recarga de tramos intermedios

Se estimaron las recargas de la cuenca intermedia entre las zonas de evaluación (AIA) y las bocatomas. La determinación de las recargas se realizó a nivel medio mensual, en régimen natural, tomando como base, en general, las series de caudales desarrollada en el marco del estudio Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico Avanzado (APR Ingeniería S/Aa).

Para estimar la recarga intermedia se realizó una transposición de los caudales medios mensuales, a través de la proporción que representa el área entre cuencas de drenaje. Para esto fueron definidos 11 puntos y tramos de interés, en los que fueron determinados curvas de variación estacional para años seco (probabilidad de excedencia de 85%), normal (PE = 50%) y húmedo (PE = 15%). Los tramos de interés se presentan en la **Tabla 6** y la **Figura 3**, mientras que los valores de las recargas para una condición de estiaje, considerada como el mínimo caudal medio mensual con probabilidad de excedencia de 85%, se indican en la **Tabla 7** (El detalle de los cálculos y los resultados se encuentran en el **ANEXO III.1 APR Ingeniería 2013b Determinación de caudales de recargas intermedias RevC.** En esta tabla también son incorporados los caudales ecológicos definidos por DGA para cada una de las bocatomas del proyecto, utilizados para la evaluación del caudal ecológico (ver **Acápite 3.7**)

La recarga considerada como aporte intermedio entre puntos con series hidrológicas fue el caudal medio mensual mínimo de la curva estacional de probabilidad de 85%. Este valor es conservador del punto de vista de disponibilidad, dado que supone aportes menores a las recargas medias anuales. Se hace referencia a la seria hidrológica representativa de cada tramo, como ejemplo, la serie P6 es la Recarga intermedia entre Maipo después de junta con Yeso y AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso, con un valor de recarga de 0,28 m3/s.

En la **Tabla 7** se indica el aumento acumulativo de los caudales desde las bocatomas hacia aguas abajo. El caudal acumulado corresponde a una situación con proyecto en condiciones de estiaje que se calculó considerando que los caudales pasantes en bocatomas son los caudales ecológicos definidos por la autoridad DGA, y que éstos van

aumentando por los aportes intermedios (de estiaje). De este modo, en cada AIA se obtendrá un caudal acumulativo, denominado como Caudal Ecológico + Recargas (**Q eco + recargas**), y que fue considerado como un caudal característico a evaluar en las curvas de disponibilidad de hábitat.

Tabla 6.- Puntos y tramos de interés para caudales y recargas intermedias mensuales (Fuente: Elaboración propia).

N°	Puntos y Tramos de Interés	Distancia Tramo (km)
1	Río Volcán antes de junta con Colina	-
2	Río Maipo antes de junta con Volcán	-
3	Recarga intermedia entre Volcán después de junta con Colina y AIA PBN-18 / Volcán en Queltehues	19 km
4	Recarga intermedia entre bocatoma Yeso y AIA-PBN-15	15 km
5	Recarga intermedia entre AIA-PBN-15 y Yeso antes junta con Maipo	7 km
6	Recarga intermedia entre Maipo después de junta con Yeso y AlA San Alfonso / Maipo en San Alfonso	10 km
7	Recarga intermedia entre Maipo AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso y Puente el Toyo	8 km
8	Recarga intermedia entre Maipo en puente el Toyo y Maipo antes de junta con Colorado	11 km
9	Recarga intermedia entre AIA COL-2 / Empalme Alfalfal y AIA PBN-20	11 km
10	Recarga intermedia entre AIA PBN-20 y Colorado antes de junta con Maipo	10 km
11	Recarga intermedia entre Maipo después junta con Colorado y Las Lajas / Maipo en el Manzano	5 km

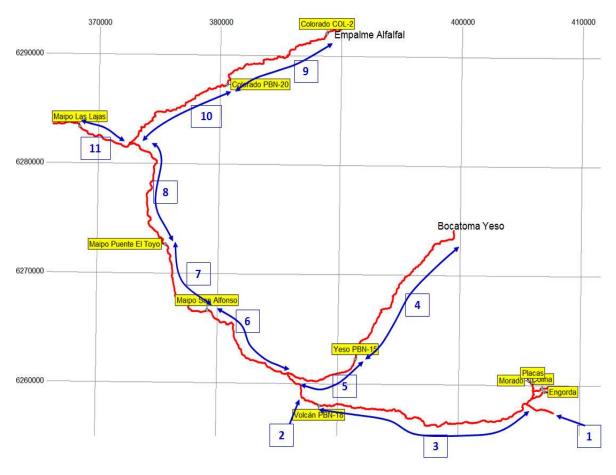


Figura 3.- Esquema de aportes de ríos y recargas intermedias asociadas a AIA, según numeración de **Tabla 6**. Datum WGS 84.



Tabla 7.- Recarga de tramos intermedios para Q estiaje y caudal ecológico definido en bocatomas por DGA.

Sección	Descripción del cálculo del Caudal en la sección de Interés, indicando la suma de caudales para obtener el valor acumulado	Referencia Series de caudales de recarga Anexo III.1*	Q sección/ Recarga estiaje por Tramo (m3/s)	Q acumulado (Q ecol + recargas de estiaje)
AIA Colina-01	Colina, Qecol DGA**		0,37	0,37
AIA MOR-01	Morado, Qecol DGA **		0,24	0,24
AIA ENG-01	Engorda, Qecol DGA **		0,20	0,2
AIA Placas-01	Placas, Qecol DGA **		0,14	0,14
Río Volcán	Sumar aporte de Volcán antes de junta con Colina	P1	2,3	3,25
AIA PBN-18 / Volcán en Queltehues	Sumar recarga intermedia entre Volcán después de junta con Colina y AIA PBN-18 / Volcán en Queltehues	P3	2,1	5,35
Río Maipo	Sumar aporte de Río Maipo antes de junta con Volcán	P2	9,2	14,55
Río Yeso	Sumar aporte de Río Yeso = Qecol RCA Yeso + recarga intermedia entre bocatoma Yeso y Yeso antes junta con Maipo	Qecol yeso + P4 + P5	1,46	16,83
AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso	Sumar recarga intermedia entre Maipo después de junta con Yeso y AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso	P6	1,7	18,53
AIA Toyo	Sumar recarga intermedia entre AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso y Puente el Toyo	P7	0,28	18,81
Río Maipo antes de junta con Colorado	Sumar recarga intermedia entre Maipo en puente el Toyo y Maipo antes de junta con Colorado	P8	0,9	19,71
Río Colorado	Sumar aporte de Rio Colorado = Qecol RCA Colorado + recarga intermedia entre AIA COL-2 / Empalme Alfalfal y Colorado antes de junta con Maipo	Qecol Colorado + P9 + P10	4,51	26,73
AIA Lajas / Maipo en el Manzano	Sumar recarga intermedia entre Maipo después junta con Colorado y Las Lajas / Maipo en el Manzano	P11	0,19	26,92
AIA COL-2 / Bocatoma Colorado	Colorado, Qecol DGA **		2,51	2,51
AIA PBN-20	Sumar recarga intermedia entre AIA COL-2 / Empalme Alfalfal y AIA PBN-20	P9	1,5	4,01
Bocatoma Yeso	Yeso, Qecol DGA**		0,82	0,82
AIA PBN-15	Sumar recarga intermedia entre bocatoma Yeso y AIA-PBN-15	P4	0,5	1,32

^{*} Informe "Estudios Hidrológicos especiales para re-análisis de caudales ecológicos y evaluación del efecto del cambio climático sobre la disponibilidad futura de recursos hídricos, Parte II" (APR Ingeniería S.A, 2013b). ** Q eclógico asignado por DGA, con posterioridad a RCA.



3.2.4 Análisis de Estacionalidad

Para evaluar las potenciales tendencias de las series estadísticas se consideró realizar una verificación de la condición de estacionalidad para las 5 series fluviométricas base del Proyecto Central Hidroeléctrica Alto Maipo.

Se plantea abordar el análisis con los siguientes pasos:

- Construcción de la función de autocorrelación (ACF) y de la autocorrelación parcial (PACF).
- Evaluación de la estacionalidad según los corolarios de Box y Jenkins (1976)
- Verificación de estacionalidad débil, mediante la utilización de Test de Hipótesis paramétricos y no paramétricos según corresponda.
- Evaluación de la tendencia de los datos mediante la aplicación del Test de Spearman.

Detalles específicos de la metodología se presentan en el ANEXO III.4 Análisis de Estacionalidad.

En la **Figura 4** se representa el esquema metodológico del análisis.

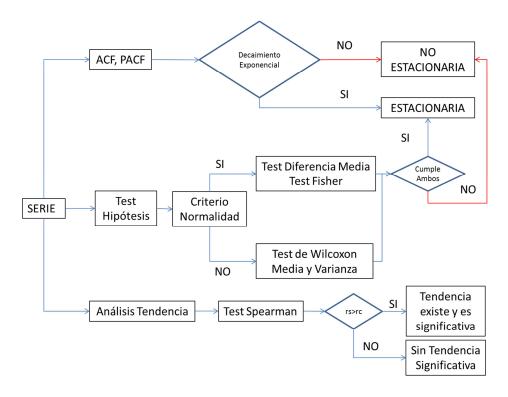


Figura 4. Esquema Metodológico del Análisis de Estacionalidad



3.3 Simulación hidráulica

Considerando las características de los ríos evaluados, de alta pendiente longitudinal a escala general, pero con cambios locales de pendiente que generan variaciones en el tipo de escurrimiento, como por ejemplo, zonas de rápido-pozas, fue necesario utilizar un modelo hidráulico que fuese capaz de reproducir un régimen mixto de flujo. Por este motivo, para resolver el eje hidráulico de los ríos y esteros estudiados, se ha utilizado el modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System). Dentro de las principales características del modelo, se pueden mencionar:

- Aplicación en ríos y canales de régimen subcrítico, supercrítico o régimen mixto.
- Modelo unidimensional, para cálculo de eje hidráulico.
- El enfoque base es resolver la ecuación de energía unidimensional, considerando la fricción (Manning), contracciones/expansiones y obstrucciones por elementos típicos en un río, como por ejemplo un puente.

La modelación hidráulica se dividió en la generación del modelo hidráulico, una fase de calibración del eje y, con los resultados de esta, una segunda etapa de modelación del eje para diferentes caudales, información que posteriormente fue utilizada para evaluar la habitabilidad con PHABSIM.

3.3.1 Implementación del modelo hidráulico

A partir de la información de topobatimetría y aforos, se implementaron modelos hidráulicos en el Software HEC-RAS para cada una de las AIA. Considerando que, fundamentalmente en los ríos de mayor caudal, por efecto del flujo los perfiles transversales no quedan distribuidos en una recta (ver **Figura 5**, en la que se ilustra cómo por efecto de la velocidad del río Maipo, la balsa desde donde son realizadas las mediciones tiende a moverse hacia aguas abajo), se procedió a proyectar todos los puntos a la recta que une los puntos medidos en ambos bordes del río/estero, para generar el perfil topobatimétrico. En la **Figura 6** se esquematiza el proceso de proyección de los puntos. Los perfiles topobatimétricos proyectados fueron ingresados al modelo hidráulico. Esta información se presenta en **Anexo II**.

De lo anterior, se desprende que la construcción de las secciones transversales fue realizada desde los bordes del cauce. Así, se trazó una recta para unir el pelo de agua de cada uno de los bordes, de modo de representar el pelo de agua de la sección completa. El motivo de esto se debió a que en los bordes, por efecto de la menor velocidad de escurrimiento, el pelo de agua presentó mayor estabilidad y menores alteraciones asociadas a la turbulencia del flujo, en comparación con la condición existente en el centro del cauce, en el que para ríos caudalosos o de alta pendiente (por ejemplo, el río



Maipo o el Colorado) se desarrollan condiciones de oleaje. La **Figura 7** esquematiza lo señalado en el párrafo anterior.

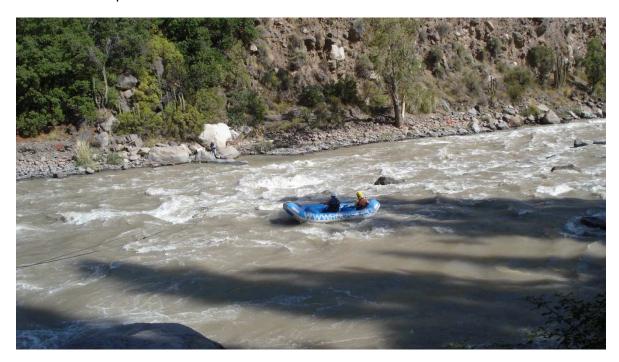


Figura 5.- Medición de perfil topobatimétrico en río Maipo.

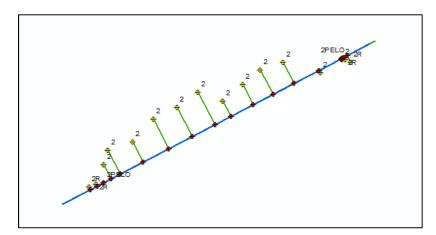


Figura 6.- Esquema de proyección de puntos. Puntos en amarillo corresponden a puntos medidos. Puntos en rojo corresponden a puntos proyectados a la recta que une ambas riberas (Fuente: Elaboración propia).



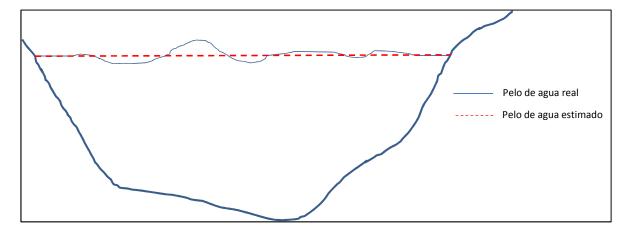


Figura 7.- Esquema de definición de altura de escurrimiento media de la sección en modelo hidráulico. Línea continua representa pelo de agua real y línea punteada indica pelo de agua proyectado para desarrollo de modelo (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a la información del perfil transversal de las secciones evaluadas en cada AIA, para cada sección se tuvo dos fuentes de información, correspondientes al perfil topobatimétrico y al perfil del aforo. Dado que el perfil topobatimétrico fue obtenido por medio de una medición topográfica, estando georeferenciado y midiendo el fondo del cauce y no el pelo de agua (como el caso del perfil de aforo), que puede tener alteraciones por el oleaje como ya fue señalado, se consideró a este cómo fuente principal de información para definir la sección transversal.

En esteros con baja turbulencia, los perfiles de aforo y topobatimétricos fueron similares, debido a la baja alteración del pelo de agua. En casos específicos y debidamente fundamentados, fueron considerados para la modelación de la sección transversal del cauce los puntos medidos en el aforo, mientras que las riberas se caracterizaron con los puntos topobatimétricos. Esto se justifica en que en perfiles angostos, la resolución del perfil de aforo fue superior a la del perfil topobatimétrico, por lo que el cauce quedó mejor caracterizado por este.

En esteros de baja turbulencia, es posible que la altura de escurrimiento sea sobrestimada por el perfil topobatimétrico, debido a que la superficie de apoyo del equipo de medición es menor a la del molinete utilizado para el aforo. En casos en los que hubiese perfiles con dificultades en la calibración, en los que se apreciaran diferencias en las alturas de escurrimiento medidas por el perfil de aforo y el topobatimétrico (con las alturas de este último superiores), se consideró utilizar el perfil del aforo para representar la sección transversal del cauce.

Para la modelación se consideró régimen mixto y, salvo casos excepcionales indicados, fue definida como condición de borde la altura normal, cuya pendiente fue determinada por la diferencia de cota entre los dos perfiles extremos de la AIA.



3.3.2 Proceso de calibración

Para efectuar la calibración del modelo hidráulico se evaluaron las condiciones generales de la rugosidad del río, mediante una caracterización de tamaños de sedimentos. La información del tamaño característico de los sedimentos gruesos (ds₉₀) se obtuvo del estudio Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico, Anexo Caracterización Hidráulico Mecánico Fluvial (APR Ingeniería S.A, S/Ab). Esta se presenta en la **Tabla 8.**

Tabla 8.- Tamaño característico del sedimento (ds_{50} y ds_{90}) en área de estudio (Fuente: APR Ingeniería S.A, S/Ab.).

Cuenca	Punto de Control	AIA asociada	Ds ₅₀ (mm)	Ds ₉₀ (mm)
Rio Volcán	El Morado BT PHAM	AIA MOR-01	30.1	94.2
	Las Placas BT PHAM	AIA Placas-01	45.3	177.9
	Las Placas a.arriba El Morado	-	45.3	177.9
	El Morado a.arriba Las Placas	-	30.1	94.2
	El Morado a.abajo Las Placas	-	30.1	94.2
	Colina BT PHAM	AIA Colina-01	101.0	223.4
	Colina a.arriba El Morado	-	101.0	223.4
	El Morado a.arriba Colina	-	30.1	94.2
	El Morado a.abajo Colina	-	30.1	94.2
	La Engorda BT PHAM	AIA ENG-01	18.8	168.1
	Volcán a.arriba Maipo	AIA PBN-18	40.7	182.9
Río Yeso	Yeso BT PHAM	-	36.2	120.9
	Yeso a. arriba Maipo	AIA PBN-15	36.2	120.9
Río Colorado	Colorado a. abajo Alfalfal	AIA Alfalfal* (AIA Col-2)	33.9	189.4
	Colorado a. arriba Maipo	AIA Maitenes (AIA PBN-20)	33.9	189.4
Río Maipo	Maipo a. arriba Volcán	-	27.7	167.8
	Maipo a. abajo Volcán	-	27.7	167.8
	Maipo a. arriba Yeso	-	5.6	164.4
	Maipo a. abajo Yeso	AIA San Alfonso (AIA PBN-05)	5.6	164.4
	Maipo a. arriba Colorado	AIA Toyo	23.2	111.4
	Maipo a. abajo Colorado	-	23.2	111.4
	Maipo a. arriba Las Lajas	AIA Lajas	27.6	148.0
	Maipo a. abajo Las Lajas Tramo 1	-	27.6	148.0
	Maipo a. abajo Las Lajas Tramo 2	-	27.6	148.0
	Maipo a. abajo Las Lajas Tramo 3	-	27.6	148.0
	Maipo a. abajo Las Lajas Tramo 4	-	27.6	148.0
	Maipo a. abajo Las Lajas Tramo 5	-	27.6	148.0
	Maipo a. abajo Las Lajas Tramo 6	-	27.6	148.0



Para la calibración del eje hidráulico fue utilizada la información de perfiles topobatimétricos y de aforos simultáneos realizados. La variable a calibrar correspondió a la rugosidad del cauce, a través del coeficiente de rugosidad de Manning (n), por medio de la comparación de las alturas de escurrimiento medidas y simuladas.

Se estimó el coeficiente de Manning para cada uno de los perfiles topobatimétricos, usando la definición del número de Strickler *St*, para determinar la rugosidad sobre la base del tamaño característico de los sedimentos d_s:

$$St = \frac{\sqrt{g \cdot n}}{d_s^{1/6}}$$
 Ecuación 1

Cuando la altura de escurrimiento (más específicamente, el radio hidráulico Rh que representa la sección de flujo) es grande en comparación al tamaño de los sedimentos d_s ($Rh/d_s \ge 10$), el número de Strickler es constante, igual a 0.12. Por otro lado, cuando Rh/d_s es inferior a 10, se dice que el escurrimiento es de tipo macrorrugoso, y el tamaño de los sedimentos tiene un mayor efecto sobre la rugosidad de la sección, la cual ha sido parametrizada por una serie de investigadores, utilizándose en el presente análisis la ecuación de Ayala y Oyarce (1993) (citado en Niño, 2005):

$$St = rac{\left(rac{Rh}{d_S}
ight)^{1/6}}{3.3\left(rac{Rh}{d_S}
ight)^{0.57}}$$
 Ecuación 2

De esta forma, el número de Strickler se incrementa para valores de $Rh/d_{\underline{s}}$ < 10, lo que a su vez repercute en el cálculo del coeficiente de rugosidad n. El tamaño de sedimentos usado como característico es el d_{s90} .

A partir de este coeficiente de rugosidad de Manning inicial empleado, se realizó la calibración de los coeficientes de rugosidad para cada AIA. Para ello, se estimó que el coeficiente de Manning está compuesto por: una rugosidad base n_0 que depende de las propiedades generales geométricas y de rugosidad media del tramo analizado, y una componente Δn , que corresponde a factores tales como irregularidades del cauce, sinuosidad, obstrucciones, entre otros. Este último factor Δn es la variable de calibración que se utilizó en este procedimiento.

La función objetivo a minimizar, definida para la calibración, fue el error medio de las alturas de escurrimiento en cada AIA, definida como:

$$Error = \sqrt{\frac{\sum (Hm - Hs)^2}{N}}$$
 Ecuación 3

donde *Hm* y *Hs* corresponden a las alturas de escurrimiento medidas y simuladas, respectivamente, y *N* al número de perfiles considerados en la calibración (que salvo para casos particulares, correspondió al total de perfiles medidos por AIA).



Las alturas simuladas, para diversos coeficientes de rugosidad, modificados por diferentes valores del parámetro de calibración Δn , fueron determinadas a través del uso del software HEC-RAS y la herramienta MR-HR (Pastenes, 2012), que corresponde a una herramienta de acople al software mencionada, en la cual se considera explícitamente la modelación de alturas de escurrimiento a través de modelos para flujos macrorugosos, tal como el indicado previamente. La obtención de consecutivos resultados para diversos valores de Δn , así como un esquema del tipo de resultados obtenidos por medio de esta forma de calibración se presenta en la **Figura 8**.

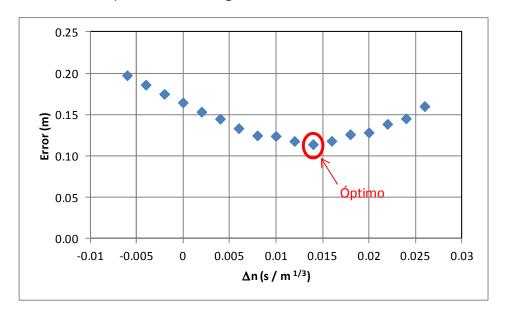


Figura 8.- Esquema tipo de resultados de calibración de Δn .

Una vez encontrado el dato óptimo de calibración Δn , se consideró este valor válido para otros caudales, ya que se estimó que tal como se indicó previamente, este factor representa características generales del tramo que generan un efecto adicional sobre la rugosidad global, independiente del caudal; en tanto, el coeficiente base n_0 se determinó nuevamente para cada caudal, ya que al modificarse las alturas de escurrimiento ocurren cambios en la fracción Rh/d_s , mediante la cual se estimó el coeficiente de rugosidad según la expresión de Strickler.

3.3.3 Modelación para serie de caudales

Una vez calibrada la rugosidad de cada AIA, se procedió a determinar el eje hidráulico asociado para una serie de caudales. Se definió para cada AIA un total de 57 caudales diferentes a modelar, dentro de cuyo rango estuvieron a lo menos el caudal ecológico determinado en el estudio de 2008, el caudal mínimo diario, el caudal medio diario y los caudales hidrológicos indicados en la **Tabla 5.**

Para el caso de las AIA en que ha sido identificada la existencia de descenso en rafting/kayak, se aseguró que dentro del rango de caudales modelados esté el caudal requerido para la actividad, de acuerdo a los resultados del estudio de 2008.

Para la modelación se consideró que Δn es invariable con el caudal, estando la variabilidad de la rugosidad con el caudal, asociada al cambio de la relación Rh/ds con el caudal. Cabe destacar que para casos en que, dado el bajo caudal, la relación Rh/ds se es menor a la unidad, se consideró que ds = Rh. Esto, en el entendido de que si la altura de escurrimiento es menor al tamaño característico del sedimento grueso, la porción de sedimento que queda por sobre el pelo de agua no genera oposición al flujo, al no estar en contacto con el mismo.

De acuerdo a lo anterior, la modelación permitió generar curvas de caudal v/s altura de escurrimiento (Q v/s h) y de caudal v/s Coeficiente de Manning (Q v/s n).

Los resultados fueron ingresados al software PHABSIM, lo que permitió determinar la habitabilidad asociada a los diferentes caudales simulados.

3.3.4 Distribución transversal de la velocidad

Para la aplicación del módulo de simulación de velocidades, incluido en PHABSIM, se formaron los modelos con un set de datos de velocidades medidos en terreno, es decir, se formaron modelos 1-vel. Estos modelos se basan en que para un único caudal se miden las distribuciones de velocidades transversales en todas las secciones transversales de interés. Sin embargo, en la construcción de estos modelos no siempre fue posible la obtención de la totalidad de los datos de campo, debido a que las condiciones de escurrimiento del cauce muchas veces presentaban rápidos que imposibilitaban las mediciones de velocidades a lo largo de toda la sección transversal. En estos casos, se optó por modelar la distribución transversal de velocidades mediante HEC-RAS. Por lo tanto, mediante la combinación de velocidades medidas y generadas sintéticamente se formaron los modelos.

Una vez armados los modelos, VELSIM resuelve la ecuación de Manning por celdas verticales, es decir, por cada medición realizada transversalmente, para la obtención de unos coeficientes de Manning referenciales. Esto puede apreciarse en la **Figura 9**.



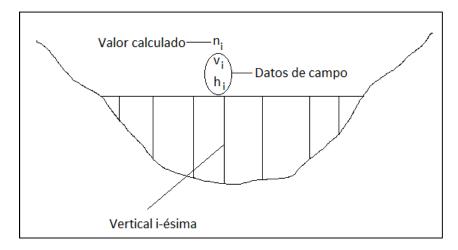


Figura 9.- Forma de operación de VELSIM (Fuente: Elaboración propia).

Por cada vertical "i" resuelve la siguiente ecuación:

$$n_i = \frac{S_e^{1/2} \cdot h_i^{2/3}}{v_i}$$
 Ecuación 4

Donde:

n_i : Representa el coeficiente de Manning de la vertical i-ésima.

h_i: Representa la profundidad medida de la vertical i-ésima.

v_i: Representa la velocidad medida de la vertical i-ésima.

S_e : Representa la pendiente de energía del perfil transversal estudiado.

Luego, para la simulación de velocidades para diferentes caudales al de calibración se emplearon los coeficientes de Manning obtenidos a partir de la **Ecuación 4**, de la siguiente manera:

$$v_i = \frac{S_e^{1/2} \cdot h_i^{2/3}}{\overline{n_i}}$$
 Ecuación 5

Donde:

v_i: Representa la velocidad calculada de la vertical i-ésima.

 $\overline{n_i}$: Representa el coeficiente de Manning de la vertical i-ésima calculado a partir de la ecuación (1).

h_i: Representa la profundidad simulada en la vertical i-ésima.

S_e : Representa la pendiente de energía del perfil transversal estudiado.



Por la forma en que se simulan las nuevas velocidades, es evidente que surge el problema de balance de masa debido a que las nuevas velocidades obedecen a coeficientes de Manning obtenidos a partir del caudal de calibración. Entonces, para solucionar esto VELSIM resuelve el siguiente set de ecuaciones:

$$Q_{prueba} = \sum_{i=1}^{n^{\circ}Celdas} A_i \cdot v_i$$
 Ecuación 6

Donde:

$$A_i = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(h_i + h_{i-1})}{2} \cdot (x_i - x_{i-1}) \right] + \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(h_{i+1} + h_i)}{2} \cdot (x_{i+1} - x_i) \right]$$
 Ecuación 7

La representación gráfica de la Ecuación 7 se muestra en la Figura 10.

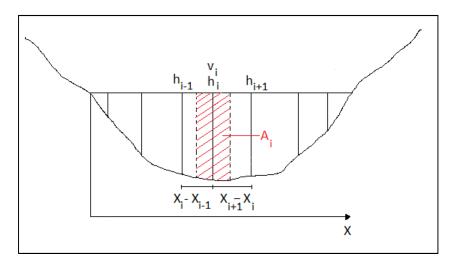


Figura 10.- Representación gráfica Ecuación 7.

Como se mencionó anteriormente, el problema de balance de masas se ve reflejado en que Q_{prueba} de la **Ecuación 8** no necesariamente representa al caudal simulado. Para resolver esto, se introduce un factor de corrección llamado VAF el cual es el siguiente:

$$VAF = \frac{Q_{simulado}}{Q_{prueba}}$$
 Ecuación 8

Luego, aplicando la **Ecuación 8** se resuelve el problema de balance de masas de la siguiente forma:

$$v_{final\ i} = v_i \cdot VAF$$
 Ecuación 9

Es interesante notar que en las últimas cuatro **Ecuaciones 6 a 9**, la pendiente de energía no aparece y, por lo tanto el rol que juega su valor inicial en la **Ecuación 4** no altera los resultados de las simulaciones de velocidades. Sin embargo, si el objetivo es analizar la variación de los coeficientes de Manning para verticales específicas entre secciones



transversales contiguas, la pendiente de energía sí juega un rol importante en la **Ecuación 4**. En este caso en particular, el objetivo es obtener la simulación de la distribución de velocidades para caudales diferentes al de calibración.

Cabe señalar que en aquellas secciones para los cuales no existe un detalle transversal completo de las velocidades de escurrimiento, es posible obtener una estimación a través de la herramienta de distribución de caudales que realiza internamente el software HEC-RAS. Este cálculo se basa en la subdivisión de la sección transversal en franjas, y para cada una de ellas se determina un factor de conducción K, definido como:

$$K_i = \frac{1}{n_i} A_i R h_i^{2/3}$$
 Ecuación 10

donde A_i y Rh_i corresponden respectivamente al área y radio hidráulico de la franja i, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning de la misma. Esta expresión permite determinar el caudal Q_i de cada una de estas franjas como:

$$Q_i = K_i J^{1/2}$$
 Ecuación 11

donde J es la pérdida de energía por unidad de largo (o pendiente de la línea de energía) para la sección total. Por constituir una discretización arbitraria de la sección de escurrimiento, la suma de los caudales obtenida de esta forma puede no coincidir de manera precisa con el caudal total, por lo que debe aplicarse un factor de corrección constante para permitir ajustar esta variable. Finalmente, a partir de estos caudales ajustados, se obtuvo la velocidad v_i en cada franja de escurrimiento aplicando la definición de la velocidad media, dividiendo el caudal por el área de escurrimiento:

$$v_i = \frac{Q_i}{A_i}$$
 Ecuación 12

3.3.5 Generación modelo de distribución de velocidad en PHABSIM

Tal como ya fue señalado, para la modelación de hábitat fue considerada una modelación 1-vel en PHABSIM. Este modelo requiere como dato de entrada la velocidad medida en cada vertical para un único caudal de calibración. Bajo este escenario, se tuvieron dos situaciones diferentes:

- 1. Secciones transversales con aforos completos
- Secciones transversales sin aforos completos.

La forma en cómo se procedió en cada caso mencionado se indica a continuación:

1.- Secciones transversales con aforos completos

Tal como fue señalado en el **Acápite** 3.3.1, se priorizó la información topobatimétrica por sobre la brindada por el aforador, en términos de la geometría de las secciones transversales y los límites del cauce principal. Así, de la información entregada por el

CENTRO DE ECOLOGIA APLICADA

aforador sólo se consideraron las velocidades medidas, las cuales típicamente diferían en su punto de medición de la vertical topobatimétrica. Por lo tanto, se estimó una distribución lineal entre las velocidades medidas en verticales adyacentes. De este modo, para unificar las dos fuentes de información, se interpoló linealmente las velocidades en cada vertical topobatimétrica según los datos de aforos, lo que queda representado en la **Figura 11**.

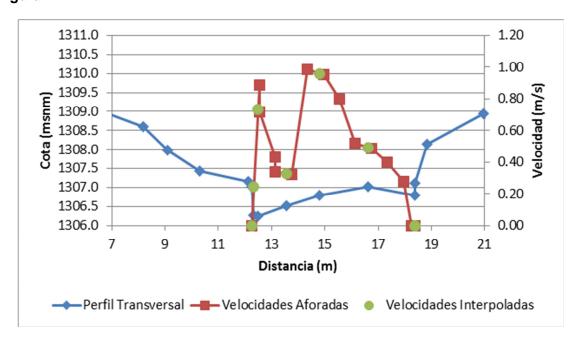


Figura 11.- Interpolación de velocidades medidas en puntos de medición de perfil transversal de terreno y cauce en perfil 8, AIA Volcán.

2.- Secciones transversales sin aforos completos

En los casos en que no hubo aforo completo a lo largo de toda la sección transversal, se optó por utilizar el simulador de velocidades de HEC-RAS (ver **Acápite** 3.3.4). Para esto fue utilizado el caudal de calibración ("Best Est Q" en PHABSIM), y se subdividió el cauce principal en 43 segmentos igualmente espaciados y 1 segmento para cada ribera. La razón por la cual se subdividió de esta forma es debido a que es el máximo de celdas que proporciona el simulador de HEC-RAS. Así, se obtuvo la velocidad media en 43 celdas del cauce principal en tramos equiespaciados.

De modo de unificar la distribución de velocidades simulada con las requeridas por el modelo 1-vel, se verificó la coordenada x de cada vertical topobatimetrica y se buscó a qué dominio de celda correspondía en el simulador de HEC-RAS. De este modo, a cada punto topobatimétrico le fue asignada la velocidad media del dominio correspondiente. En la **Figura 12** se puede apreciar la distribución de velocidades generadas por HEC-RAS por celdas para el cauce principal y las asignadas a las verticales correspondientes a la topobatimetría.

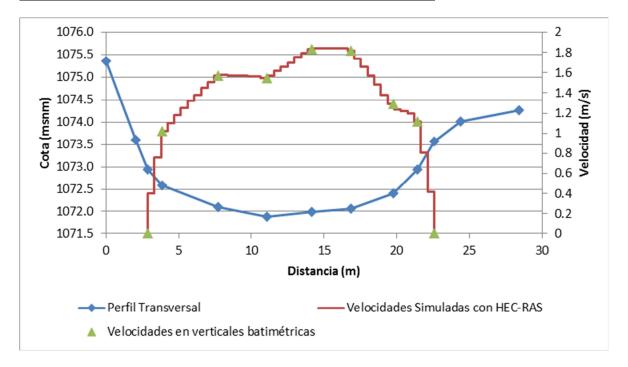


Figura 12.- Simulación de perfil de velocidad en HEC-RAS e interpolación de valores simulados en puntos de medición de perfil transversal de terreno y cauce en perfil 4, AIA Maitenes.

Es importante destacar que un mayor número de celdas implica una menor longitud de las mismas, representando de esta forma velocidades medias de celdas más pequeñas, las cuales se acercan al concepto de velocidad medida en una vertical.



3.4 Criterios de idoneidad de Hábitat

3.4.1 Actualización de la línea base de la componente biológica

De modo complementario a la información existente, se han ejecutado nuevas campañas de monitoreo que permiten realizar una actualización de la línea base. Dentro de las variables monitoreadas, han sido incluidas la presencia de especies ícticas y macroinvertebrados (tanto en abundancia, cómo en riqueza) dentro del área de estudio.

La información obtenida permitió definir la evaluación a realizar en cada una de las AIA. Al respecto, cabe señalar que a diferencia del Estudio de Caudal Ecológico del PHAM (CEA, 2008), en el que se evaluaron AIA bajo el supuesto de presencias potenciales de peces, en el presente solamente se evaluó en función de presencia verificada de la especie (en el caso de los peces), de acuerdo a la información disponible obtenida de los monitoreos.

Lo anterior se complementó con la determinación de los usos presentes en el río, los cuales se obtuvieron de la información contenida en el estudio de caudal ecológico del año 2008 (CEA, 2008) y su actualización con la información de línea base obtenida hasta marzo 2013.

En el caso de información proveniente de línea base, se procedió a asociar a cada AIA la estación de monitoreo más cercana, recopilando los datos de riqueza y cobertura de peces y macroinvertebrados bentónicos. En el caso de peces, se utilizó la información de talla para asociarlos a su estadio de vida.

Para la caracterización limnológica y de peces del área asociada al PHAM, se muestrearon un total de 23 estaciones en cuatro campañas de monitoreo en los meses de agosto 2008, septiembre y diciembre 2012 y marzo 2013. De dichas estaciones, se seleccionaron aquellas que dieran cuenta de la presencia de peces y macroinvertebrados bentónicos en las AIA a evaluar en el presente estudio.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, si se consideran los datos conjuntos de las cuatro campañas de muestreo mencionadas, se registró su presencia en las 23 estaciones de muestreo, por lo tanto en todas las AIA del presente estudio. La **Figura 13** presenta los órdenes presentes por campaña de muestreo y estación para las distintas campañas de monitoreo.

Durante las campañas de agosto 2008, septiembre 2012, diciembre 2012 y marzo 2013 se registraron un total de 17, 23, 28 y 37 taxa zoobentónicos respectivamente. Cabe señalar que en el caso de la campaña de agosto 2008, no se cuenta con información de los esteros de alta montaña.

Los máximos totales por sector estuvieron dados en los ríos Volcán y Yeso. El río Colorado también presentó una alta riqueza, salvo la campaña de diciembre 2012, donde las estaciones PHAM-01 y PHAM-02 del río Colorado, presentaron valores nulos de

Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

riqueza, probablemente debido a que las condiciones de hábitat mostraban caudales y velocidades de corriente más elevadas en relación al resto de las estaciones.

Se observó una amplia dominancia de insectos dípteros, destacando por su aporte en abundancia la familia Chironomidae, la cual resultó particularmente importante en los sectores del río Maipo y río Colorado, a los que se suma el río Yeso en la campaña de diciembre 2012.

Debido a la presencia y contribución de especies del orden Ephemeroptera en los sectores del río Volcán, parte alta del río Yeso y esteros de Alta montaña, así como la abundancia y diversidad alcanzadas por este grupo, ambos sectores destacan en cuanto a la calidad de agua, en particular durante la campaña de diciembre de 2012.

El sector de esteros de alta montaña, en el tramo medio del estero La Engorda y en el río Morado al llegar a la junta con el Colina, se encontró dominado en la campaña de septiembre 2012 por el tricóptero *Polycentropus* sp. y el efemeróptero *Meridialaris* sp., respectivamente, donde cabe destacar que en ambos casos se trata de taxa indicadores de la buena calidad de agua (Figueroa *et al.* 2007).

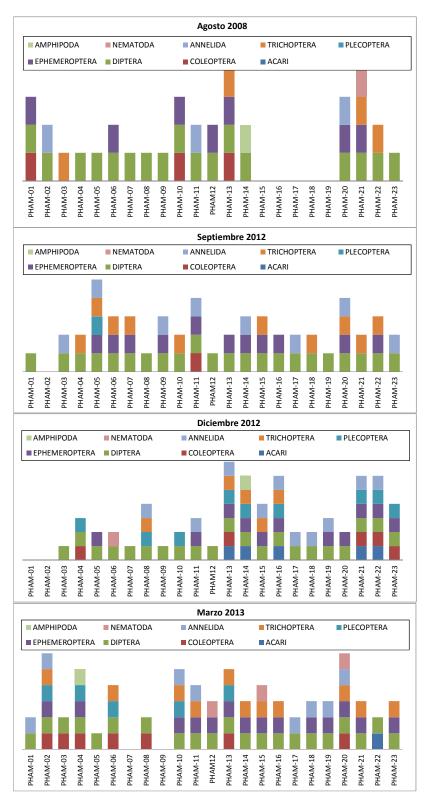


Figura 13.- Macroinvertebrados bentónicos en el área de estudio. Las barras indican la cantidad de órdenes presentes en cada estación de muestreo, para las distintas campañas (Fuente: Elaboración propia).



Respecto a la **fauna íctica**, se registró un total de tres especies: la especie nativa *T. areolatus* y los salmonídeos introducidos *S. trutta* y *O. mykiss.* Estas especies representan una baja proporción del total de fauna íctica descrita para la cuenca del Maipo, lo que es esperable debido a que el presente estudio abarca solamente la parte alta de la cuenca, sumado a que la baja presencia de peces se corresponde con el patrón natural de los sistemas acuáticos que ocurre en respuesta a una menor disponibilidad de hábitats y un menor nivel de trofía en zonas altas, en comparación a zonas media y baja de los sistemas fluviales (Vannote *et al.* 1980, Welcomme 1985). Cabe destacar que *T. areolatus* presenta problemas de conservación, encontrándose categorizada como "Vulnerable" de acuerdo al Decreto Supremo 51 (República de Chile, 2008). Las truchas no han sido consideradas en procesos de clasificación de especies debido a su carácter de exóticas.

La riqueza y abundancia son bajas en el área de estudio, especialmente en el río Volcán y en los esteros de Alta Montaña, donde no se han observado peces. Además, en los ríos Maipo y Colorado, se observan varias estaciones con colectas nulas, lo que respondería a los factores anteriormente señalados. Destaca el río Yeso debido a que presenta peces en todas sus estaciones. El río Maipo es el más rico en especies, aunque el río Yeso presenta los ensambles con mayor abundancia de peces.

Las especies salmonídeas introducidas son las más representativas del área de estudio, en términos espaciales y de abundancia, destacando especialmente *S. trutta*. Cabe destacar que *T. areolatus*, única especie nativa del área de estudio, fue descrita solamente en el río Maipo, en el sector cercano a la confluencia con el río Colorado. Respecto de esto, Acuña et al. (2005) han señalado que las truchas se ven favorecidas en estos ríos andinos, debido a que presentan ventajas adaptativas por ser originarias de ríos de tipo ritrónico (CEA, 2013).

Según lo señalado por CEA (2013), las especies introducidas presentan factores de condición mayores que los registrados por *T. areolatus*, aunque esto respondería a diferencias dadas por la biología particular de cada especie. No obstante, el estado de delgadez de *S. trutta* en el río Maipo sugiere que esta especie se encontraría expuesta en este sistema a condiciones de hábitat que le suponen un mayor gasto energético (aumento de caudales, altas velocidades de corriente). Además, el escaso contenido estomacal encontrado sugiere una escasez de recurso alimenticio en este río, en comparación a lo registrado en el río Yeso, donde los peces mostraron buen factor de condición y un contenido estomacal variable y abundante.

La mayor riqueza y abundancia de peces en diciembre de 2012 respecto de las restantes campañas es un patrón observado en los tres ríos con presencia de peces.

Respecto al estadio de vida de las especies encontradas en los tramos de río a evaluar, se consideró la longitud total de los ejemplares como indicador de dicho estadio. Si bien el rango de longitudes para los distintos estadios de vida es altamente variable y dependiente de factores bióticos y abióticos (Fulton, 2004), se cuenta con varios estudios



que dan cuenta de esta información. En el caso de *T. aerolatus*, el rango de tamaños encontrados en el área de estudio fue de 4 a 10.5 cm, los cuales corresponderían a ejemplares adultos y juveniles según lo indicado por Manríquez *et. al.* (2008) en su estudio en el río Angostura. La misma situación se registró para *O. mykiss*, cuyo rango de longitudes fluctuó entre 9.1 a 19.6 cm, lo cual según las referencias bibliográficas consultadas correspondería a ejemplares juveniles y adultos. Respecto a *S. trutta*, se consultaron varios estudios que dieron cuenta de la longitud en la que los individuos alcanzan su madurez sexual, la cual promedió 16.5 cm (promedio entre 30 estudios). Sin embargo no se cuenta con información para delimitar el tamaño mínimo de las especies en estadio juvenil, por lo que se considera para efectos de la simulación de hábitat la presencia de juveniles y adultos. En la **Tabla 9** se presenta un resumen con la información de talla de las especies capturadas en el estudio de línea base (CEA, 2013), así como las referencias bibliográficas citadas.

Tabla 9.- Rango de longitudes para las especies presentes en el área de estudio. Se presentan el rango de valores de las especies capturadas en el estudio de línea base, así como rangos referenciales para distintos estadios de vida (Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias señaladas).

	Trichomycterus areolatus	Oncorhynchus mykiss	Salmo trutta	Referencias
Rango Longitud observada en estaciones asociadas a AIA	4 - 10.5 cm	9.1 - 19.6 cm	8 - 29.2 cm	1: Manriquez et. al., 1988
	< 2.5 cm (individuos con restos de saco vitelino) ¹	5 - < 12 cm (ríos pequeños) ²		2: PCWA, 2008
Rango Longitud estadio juvenil	2.5 - 5.5 cm ¹	5 - < 15 cm (ríos grandes) ²	16.5 cm (límite madurez sexual) ⁴	3: USDA, 1986
		15 cm (límite madurez sexual) 3		4: fishbase.org (valor promedio obtenido de 30 estudios disponibles en el sitio web)
Rango Longitud estadio adulto	> 5.5 cm ¹			·

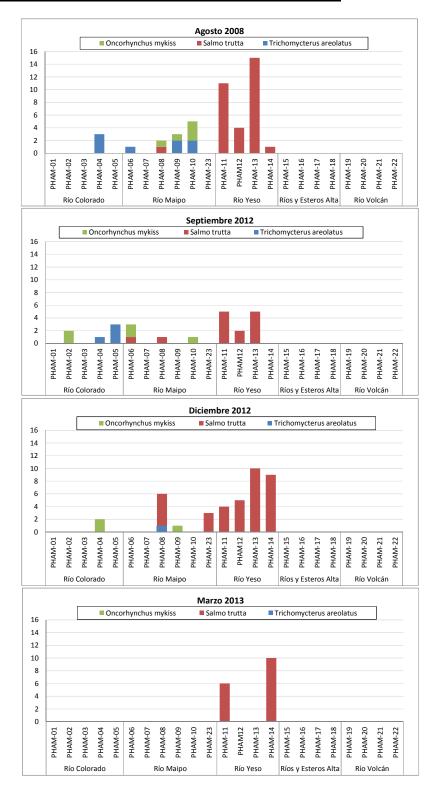


Figura 14.- Fauna íctica en el área de estudio. Las barras indican la cantidad de especies presentes en cada estación de muestreo, para las distintas campañas (Fuente: Elaboración propia).



La **Tabla 10** presenta un resumen con las distintas especies a evaluar en la determinación del caudal ecológico para cada una de las AIA.

Tabla 10.- Resumen de especies a evaluar en la determinación del caudal ecológico (Fuente: Elaboración propia).

Río/Estero	AIA	Fauna íctica ¹	Macroinvertebrados Bentónicos ²
	San Alfonso (PBN-05)	St	E, P, T
Maipo	Toyo (TOYO)	Ta, Om	E, P, T
	Lajas (Lajas2)	Ta, St, Om	E, P, T
Colorado	Alfalfal (COL-2)		E
Colorado	Maitenes (PBN-20)	Ta, Om	P, T
Yeso	Yeso (PBN-15)	St	E, P, T
Volcán	Volcán (PBN-18)		E, P, T
Morado	Morado (MOR1)		E, P, T
Placas	Placas (PLACAS-01)		E, P, T
Colina	Colina (COLINA01)		E, T
Engorda	Engorda (ENG01)		E, T

^{1:} St: Salmo trutta, Om: Oncorhynchus mykiss, Ta: Trichomycterus areolatus

3.4.2 Curvas de preferencia asociadas a las distintas especies

Se recopilaron bibliográficamente las curvas de preferencia para los distintos usos identificados, utilizando los estudios recopilados en el informe de caudal ecológico del año 2008 (CEA, 2008), además de nuevas referencias bibliográficas. Estas curvas presentan la relación entre la preferencia de hábitat y las variables velocidad de la corriente, profundidad y sustrato. Para la fauna íctica, se distinguió entre los distintos estadios de vida detectados en terreno.

En el caso del uso del río por la fauna íctica introducida, se encontraron distintas curvas de habitabilidad, las cuales fueron contrastadas entre sí para chequear su consistencia, incluyendo las contenidas en la librería de PHABSIM. Para la selección de las curvas se privilegiaron aquellas que tuviesen mayor cantidad de datos, que fuesen consistentes bajo criterio experto y que, en lo posible, hubiesen sido determinadas para ríos chilenos de características similares a los estudiados.

Las principales fuentes consultadas respecto a fauna íctica corresponden a la biblioteca de PHABSIM, USFWS (1986), USFWS (1984) y EULA (2000).

En el caso de los macroinvertebrados bentónicos, se encontraron distintas curvas de habitabilidad para varios de los órdenes y familias presentes en el área de estudio. En primer lugar se compararon las curvas de las distintas fuentes para chequear su consistencia y se seleccionaron aquellas que fuesen representativas de las distintas AIA,

^{2:} E: Ephemeroptera, P: Plecoptera, T: Trichoptera

según lo analizado de la información de línea base. Estos órdenes corresponden a Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera.

Las principales fuentes consultadas en cuanto a zoobentos corresponden a EULA (2000), Fengging *et al.* (2008), Jowett (2003), Diez (2008) y Gore *et al.* (2001).

• Curvas seleccionadas para la fauna íctica

Las curvas de habitabilidad de la trucha café (*salmo trutta*) y trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) fueron obtenidas de los estudios realizados por el U.S. Fish and Wildlife Service en los años 1986 y 1984 respectivamente. La **Figura 15** y **Figura 16** muestran las curvas de habitabilidad para los estadios juvenil y adulto de las truchas café y arcoíris respectivamente.

Respecto a *Trichomycterus areolatus*, se utilizaron las curvas de habitabilidad elaboradas por EULA (2000) para las variables profundidad y velocidad de la corriente y de sustrato elaboradas por Conklin *et al.* (1996) para la especie channel catfish (ver **Figura 17**). Vila *et al.* (1999), señalan la ausencia de información referida a la biología e historia de vida de los bagres presentes en nuestro país, razón por lo cual la única forma de establecer los requerimientos de hábitats del bagre presente en el río Maipo, es homologarlo a especies presentes en otras latitudes que presenten descripciones ecológicas más completas, como es el caso de channel catfish. En la curva desarrollada por Conklin *et al.* (1996) para la variable sustrato, se indica que las mayores preferencias ocurren para sustratos del tipo limo y arena, mientras que para sustratos del tipo grava y guijarro, que son los predominantes en el área de estudio, la preferencia es baja (<0,1), lo cual es consistente con las observaciones de terreno en cuanto a la baja abundancia y estado de esta especie (CEA, 2013).

El detalle de las curvas de habitabilidad de fauna íctica se presenta en **Anexo V**, adjuntas a cada uno de los modelos PHABSIM.

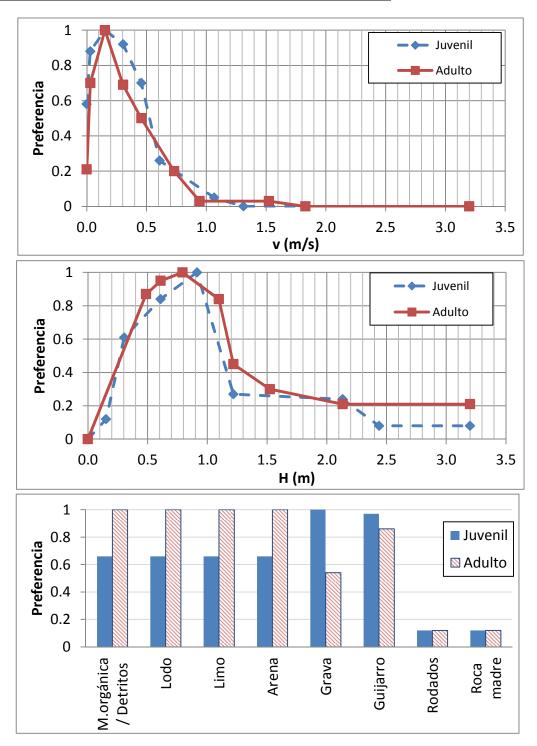


Figura 15.- Curvas de habitabilidad trucha café. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de USFWS, 1986).

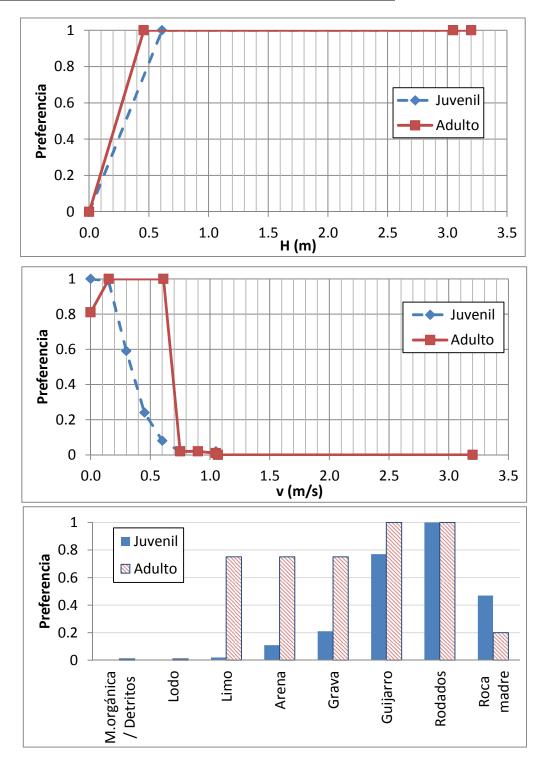


Figura 16.- Curvas de habitabilidad trucha arcoíris. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de USFWS, 1984).



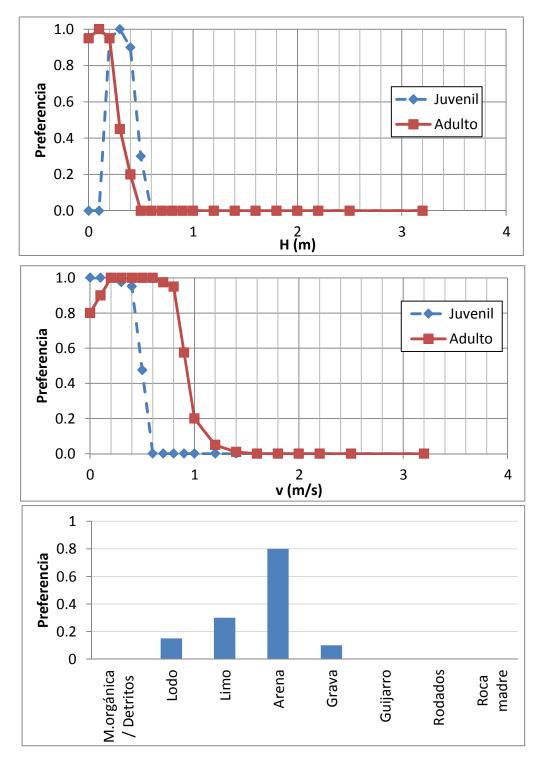


Figura 17.- Curvas de habitabilidad bagre. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de EULA, 2000 y Conklin *et al.*, 1996).



Curvas seleccionadas para macroinvertebrados bentónicos

Se realizó una revisión bibliográfica de las curvas de preferencia de zoobentos procurando incluir las especies presentes en el área de estudio. Se seleccionaron las curvas generadas en el estudio de Gore et al. (2001), donde mediante un muestreo de 1200 muestras en 10 años, a lo largo de distintos ríos y esteros del sudeste de Estados Unidos, se generaron curvas genéricas de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera los cuales, además de ser cuantificados dentro de los estudios de línea de base del PHAM (CEA, 2013), son bioindicadores de calidad de agua. Las curvas de habitabilidad para las variables profundidad, velocidad y sustrato se presentan en la **Figura 18**. En cuanto a la variable sustrato, se utilizaron los códigos señalados en la **Figura 18** y en el caso del código 1 (detritos/materia orgánica), se utilizó el promedio de los valores reportados en Gore et al. (2001).

Cabe señalar que pese a haber seleccionado para efectos del presente estudio las curvas generadas por Gore *et al.* (2001), se encontraron similitudes en la forma y valores de las curvas reportadas por otros autores (EULA, 2000; Fengqing *et al.*, 2008; Jowett, 2003; Diez, 2008).

El detalle de las curvas de habitabilidad de macroinvertebrados bentónicos se presenta en **Anexo V.2**.

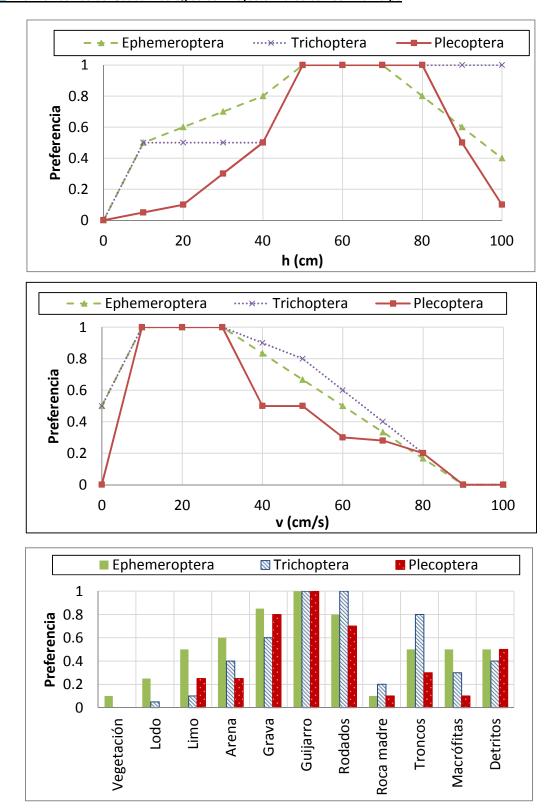


Figura 18.- Curvas de habitabilidad zoobentos. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de *Gore et al.*, 2001).



3.5 Evaluación PHABSIM

3.5.1 Modelación del hábitat

Para la modelación del hábitat, se utilizó el software PHABSIM, que permite obtener el hábitat ponderado útil (WUA por su sigla en inglés) para distintos caudales de simulación.

La modelación de hábitat realizada con PHABSIM se basa en el supuesto de que las especies acuáticas reaccionan frente a cambios en las condiciones hidráulicas del medio que ocupan, los cuales se generan producto de variaciones en el caudal pasante. Esta modelación se realizó en tramos de río representativos de la presencia de estas especies y con valor ecológico, correspondientes a las AIA definidas para el tramo en estudio. El producto final de esta modelación es la relación entre hábitat ponderado útil versus caudal.

Se utilizó el modelo HABTAE, dado que entrega una mayor versatilidad en cuanto a las simulaciones de hábitat en términos velocidad de la corriente. Por otra parte, dada la baja riqueza y abundancia de especies, no se analizó el efecto de competencia entre organismos ni de migración lateral.

3.5.2 Representación de AIA en PHABSIM

Para la representación de las condiciones de hábitat en los distintos tramos de río, se utilizaron como datos de entrada los resultados de las modelaciones hidráulicas ejecutadas en HEC-RAS, además de la geometría de las distintas secciones transversales determinadas en terreno y la información de sustrato disponible. Utilizando esta información, cada AIA se conceptualizó como un agregado de celdas, en cada una de las cuales se conoce la profundidad del pelo de agua, velocidad y tipo de sustrato, como se ilustra en la **Figura 19**. Dado que los perfiles transversales de cada AIA están a corta distancia y la variabilidad de las condiciones entre perfiles sucesivos es baja, se utilizó un esquema de establecimiento de celdas centrado.

Para ingresar al modelo la información de tipo de sustrato en cada AIA (parámetro Channel Index), se utilizó la asociación entre tamaño y tipo de sustrato que se presenta en la **Figura 20**. En la **Tabla 11** se presentan los valores de CI asociados al área de estudio.

La información del tamaño medio de los sedimentos gruesos (ds₉₀) se obtuvo del estudio Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico, Anexo Caracterización Hidráulico Mecánico Fluvial (APR Ingeniería S.A, S/Ab). Dado que la información disponible para efectos del presente estudio considera la caracterización del sedimento en un único punto del lecho, y en ausencia de otra información, se adoptó como supuesto que el sustrato es el mismo para todas las celdas de cada AIA.



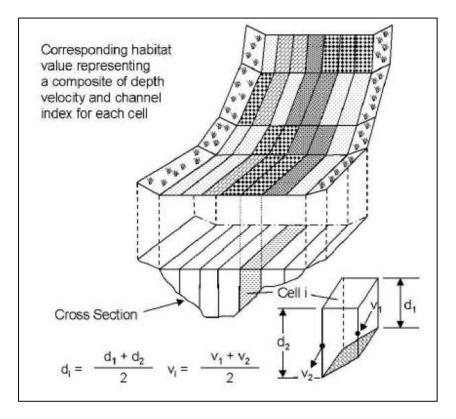


Figura 19.- Conceptualización de un tramo de río en PHABSIM. (Fuente: USGS, 2001)

```
The following categories can be used for IFIM analyses (see Bovee 1982):

1 = plant detritus/organic material
2 = mud/soft clay
3 = silt (particle size F 0.062 mm)
4 = sand (particle size 0.062-2.000 mm)
5 = gravel (particle size 2.0-64.0 mm)
6 = cobble/rubble (particle size 64.0-250.0 mm)
7 = boulder (particle size 250.0-4000.0 mm)
8 = bedrock (sol id rock)
```

Figura 20.- Códigos según tipo de sustrato. (Fuente: USFWS, 1986).



Tabla 11.- Tamaño medio de sedimento y valor del parámetro Channel Index (CI) para cada AIA (Fuente: Elaboración propia).

Río/Estero	AIA	Ds ₅₀ (mm)	CI
	San Alfonso (PBN-05)	5.6	5
Maipo	Toyo (TOYO)	23.2	5
	Lajas (Lajas2)	27.2	5
Colorado	Alfalfal (COL-2)	33.9	5
Colorado	Maitenes (PBN-20)	33.9	5
Yeso	Yeso (PBN-15)	36.2	5
Volcán	Volcán (PBN-18)	40.7	5
Morado	Morado (MOR1)	30.1	5
Placas	Placas (PLACAS-01)	45.3	5
Colina	Colina (COLINA01)	101	6
Engorda	Engorda (ENG01)	18.8	5

3.5.3 Determinación del hábitat ponderado útil (WUA)

Utilizando el módulo HABTAE, se calculó para cada una de las celdas, el hábitat ponderado útil (WUA) asociada a un cierto caudal simulado y una cierta especie o uso antrópico. Dado que la simulación hidráulica para un determinado caudal define una cierta velocidad (v), profundidad (h) y sustrato (s) asociado a una celda, se obtuvieron los valores de preferencia del hábitat utilizando cada una de las curvas de habitabilidad. La ponderación de estos valores por el área de la celda permitió obtener el WUA de la celda, tal como se muestra esquemáticamente en la **Figura 21**. Posteriormente, la suma de las WUA de todas las celdas de una sección permitió obtener el WUA total de dicha área, para el caudal modelado. Al repetir este procedimiento para distintos caudales, se obtuvo la curva WUA vs Q, como se muestra en la **Figura 22**.

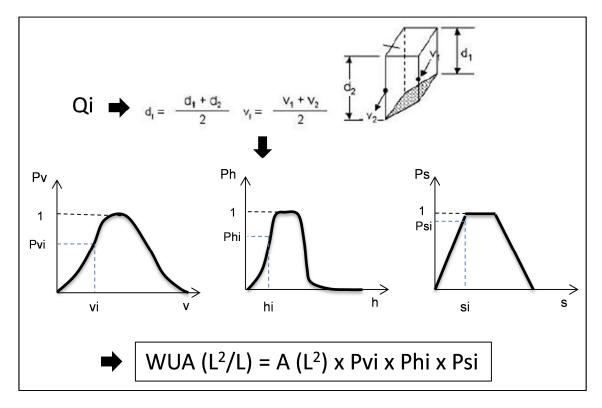


Figura 21.- Metodología para la determinación del hábitat ponderado útil (WUA) para un tramo de río, bajo el método multiplicativo. (Fuente: Modificado de USGS, 2001).

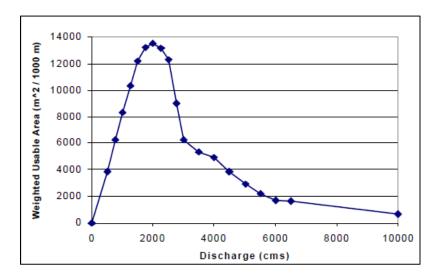


Figura 22.- Curva de hábitat ponderado útil (WUA) versus caudal (Q). (Fuente, USGS, 2001).



3.6 Usos antrópicos

3.6.1 Criterios de evaluación

Los principales usos no-consuntivos asociados a actividades antrópicas en los ríos en estudio fueron identificados en CEA (2008). Se identificaron los siguientes usos:

- Rafting: corresponde al uso del río Maipo desde la desembocadura del Yeso hasta el sector de San José de Maipo sector Parque Los Héroes mediante balsas operadas por varias empresas turísticas.
- Kayak: corresponde al uso del río Maipo desde la desembocadura del Yeso hasta el sector de San José de Maipo sector Parque Los Héroes por deportistas y operadores turísticos.

De este modo, el caudal antrópico fue evaluado en las AIA Toyo y San Alfonso.

Para cada uno de los usos se identificó en la literatura los umbrales que limitan la realización de dichas actividades, en términos de la profundidad y velocidad de escurrimiento del agua (ver **Tabla 12**). Posteriormente, se seleccionaron aquellos presentes en el área de estudio.

Tabla 12 Umbrales de	profundidad v	altura de cursos	fluviales para	diferentes usos.

Usos antrópicos		Críticos y máximos)	- Bibliografía	
Osos antropicos	Profundidad	Velocidad	Bibliografia	
	(m)	(m/s.) V _{máx} : 4.5 ^D		
	P_{min} : 0.1 – 0.2 ^A	V _{máx} : 4.5 ^D		
Kayak/ canoa/ rafting	P _{min} : 0.6 ^{B,C}		^A : Gordon y col. (2004)	
	P _{min} : 0,2 ^D		^B : Rood y Tymensen	
Remar/ Vadear	P _{máx} : 1.2 ^D	V _{máx} : 1.8 ^D	(2001)	
Pesca/ Vadear	P _{máx} : 1.2 ^D	V _{máx} : 1.8 ^D	c: Rood y col. (2003)	
Nado	P _{min} : 0.8 ^D	V _{máx} : 1.0 ^D	^D : Mosley (1983)	
Buceo	P _{min} : 0.3 ^D	V _{máx} : 2.0 ^D		
Caminatas	P _{máx} : 1.2 ^D	V _{máx} : 1.8 ^D		
Pesca (Bote)	P _{min} : 0.3 ^D	V _{máx} : 3.0 ^D		
Bote (Sin motor)	P _{min} : 0.5 ^D	V _{máx} : 1.5 ^D		
Bote a vela	P _{min} : 0.8 ^D	V _{máx} : 0.5 ^D		
Botes a motor (bajo poder)	P _{min} : 0.6 ^D	V _{máx} : 3.0 ^D		
Botes a motor (alto poder)	P _{min} : 1.5 ^D	V _{máx} : 4.5 ^D		
Lancha (Jetboating)	P _{min} : 0.1 ^D	V _{máx} : 4.5 ^D		

Los valores indicados en la **Tabla 12** se complementan para el caso del rafting con un ancho mínimo de 7.5 m (Mosley, 1983) y con valores óptimos para el rafting de 0.8-1.5 m de profundidad y ancho mayor a 20 m (Ministry of the Environment of New Zealand, 1998, en Harding et al. 2004).

Para el caso particular del descenso en Rafting/Kayak, en CEA (2008) se definió como requerimiento para poder realizar la actividad la mantención de un ancho mínimo de 12 metros, con una profundidad mínima de 60 cm, lo que de acuerdo a los valores

presentados anteriormente corresponderían a una condición media entre el mínimo y el óptimo.

Para el presente estudio han sido considerado cómo criterios de evaluación la condición mínima y la evaluada por CEA (2008), considerando para el ancho de 12 metros una condición de continuidad del pelo de agua. Cabe destacar que los valores utilizados en CEA (2008) corresponden a una condición intermedia entre el mínimo y el óptimo, por lo que en este estudio se lo señaló como una condición "media" o "normal".

3.7 Resultados modelación de hábitat

Para el análisis de los resultados de la modelación de hábitat, se procedió a exportar los valores de WUA v/s Q a una planilla de cálculo y fueron graficados para cada especie en análisis, dependiendo de cada AIA. Se analizaron las diferencias de hábitat entre las distintas especies, estadios de vida, órdenes de macroinvertebrados y su relación con lo observado en la caracterización de línea de base del PHAM (CEA, 2013).

Adicionalmente, se definieron los siguientes puntos característicos para cada curva de habitabilidad:

- WUA máximo y caudal que lo produce (Q_{opt}).
- WUA característico de una condición media del río. Este fue definido como el hábitat que se produce bajo el caudal medio anual (Q_{ma}) en condiciones naturales.
- WUA mínimo. Este fue definido como el hábitat que se produce bajo el caudal mínimo histórico de 7 días (Q_{7min}) en condiciones naturales.
- WUA que se produce bajo el caudal ecológico definido por DGA, al cual se le suman las recargas intermedias desde la respectiva bocatoma hasta cada AIA.

Se utilizaron los puntos característicos antes mencionados para analizar los resultados de hábitat ponderado útil desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema. Para ello se analizaron los lineamientos propuestos por Hudson *et al.* (2003) en cuanto a la discusión de caudales ecológicos bajo la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Estos son:

- Mantener niveles de hábitat óptimo,
- Mantener el hábitat o un porcentaje de este que se produzca bajo condiciones medias de caudal,
- Proveer un hábitat mínimo,

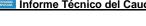
Informe Técnico de<u>l Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo</u>

 Seleccionar un punto de inflexión dentro de la curva WUA/Q. Esto es, aquel caudal para el cual una disminución de este en una cierta magnitud significa una pérdida de hábitat mayor al que se ganaría si se incrementara el caudal en la misma proporción.

Adicionalmente se presentaron a modo referencial los valores del hábitat ponderado útil para una condición media de estiaje, para año seco, normal y húmedo (85, 50 y 15% de probabilidad de excedencia). Los caudales de estiaje considerados para definir la condición media correspondieron a Q_7 , Q_{10} , $Q_{mín\ mensual}$, Q_{330} y Q_{347} . Los valores determinados correspondieron al promedio del hábitat asociado a cada uno de estos caudales.

En lo que respecta al caudal de uso antrópico, los valores obtenidos para el descenso en kayak y rafting fueron comparados con los caudales naturales del río Maipo, considerando caudales medios mensuales característicos de años seco (Q_{85}) , húmedo (Q_{15}) y normal (Q_{50}) , además del caudal medio mensual anual, durante el período en que la actividad es realizada (octubre – abril).

Para el caso de los caudales medios mensuales de año seco y húmedo, fue considerado APR Ingeniería (2013a). Los caudales medios mensuales anuales y de año normal en San Alfonso, fueron obtenidos de CONIC B.F (2008). Para el caso de la AIA Toyo, los caudales medios mensuales anuales y de año normal se obtuvieron adicionando a los valores de San Alfonso, las recargas respectivas para cada mes evaluado, recargas obtenidas de APR Ingeniería (2013b).



RESULTADOS

4.

4.1 Hidrología en Áreas de Importancia Ambiental

El estudio hidrológico actualizado desarrollado por APR Ingeniería S.A (2013a y b) se encuentra en el **Anexo III.1**. Junto a este, también se incluye el "Anexo Caracterización del Régimen de Caudales Medios Diarios" del estudio Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico, (APR Ingeniería S.A, S/Aa). Un resumen de los resultados utilizados para este estudio, se presenta a continuación.

4.1.1 AIA Lajas

En la **Tabla 13** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Maipo en el sector las Lajas, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 13.- Caudales de estiaje en río Maipo en AIA Lajas (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃ 0 (m ³ /s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	64.7	56	56.6	65.1	58.6
50%	50.0	43.5	45.2	51.0	47.9
85%	34.5	31.8	31.9	34.7	33.5
Mínimo		21.9			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a julio (11 veces), seguido de mayo y agosto (8 veces). Pese a lo anterior, para condiciones de año seco, el caudal mínimo medio mensual correspondió al de agosto (36.4 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 118 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 11.8 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 23**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.



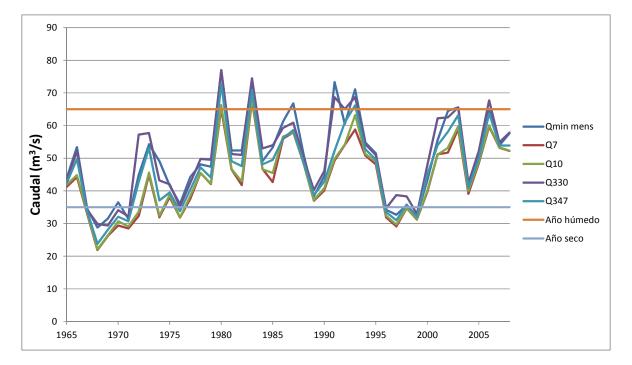


Figura 23.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Maipo en AIA Lajas (Fuente: Elaboración propia).

4.1.2 AIA Toyo

En la **Tabla 14** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Maipo en el sector el Toyo, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 14.- Caudales de estiaje en río Maipo en AIA Toyo (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m³/s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	43.4	35.5	37	43.1	39.8
50%	32.8	28.6	28.9	33.6	31.5
85%	21.7	18.1	18.4	22.5	20.7
Mínimo		14.1			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (11 veces), seguido de junio (10 veces). El caudal mínimo medio mensual para año seco, correspondió al de julio y agosto (24.2 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 79 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 7.9 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 24**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.



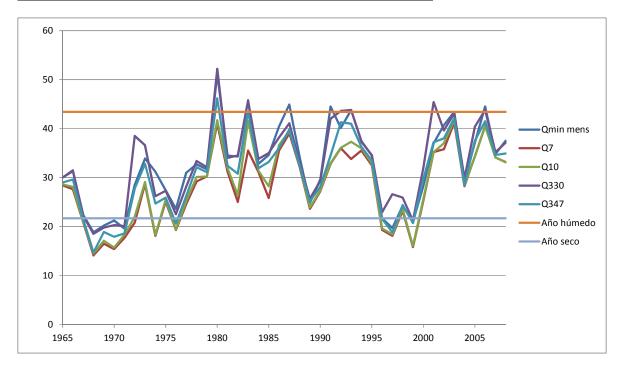


Figura 24.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Maipo en AIA Toyo (Fuente: Elaboración propia).

Considerando que en el tramo representado por esta AIA se produce descenso en rafting entre los meses de octubre y abril (CEA, 2008), se incluye información de los caudales medios mensuales característicos de año seco, normal y húmedo, además del caudal medio mensual para esta AIA, para ser utilizado a modo de comparación (ver **Acápite** 4.7.2). Los resultados se presentan en la **Tabla 15.**

Tabla 15.- Caudales medios mensuales característicos en río Maipo en AIA Toyo (Fuente: * APR Ingeniería, 2013a. ** CONIC BF, 2008 y APR Ingeniería, 2013b.).

P. exc	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
15%*	93.8	152.2	249.6	241.3	167.2	101.5	68.3
50%**	62.9	109.5	136.5	116.2	83.3	62.2	44.0
85%*	45.9	76.5	99.3	83.9	62.2	43.7	32.7
Qmedio **	68.7	116.4	167.4	150.8	103.9	70.9	48.8



4.1.3 AIA San Alfonso

En la **Tabla 16** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Maipo en el sector de San Alfonso, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 16.- Caudales de estiaje en río Maipo en AIA San Alfonso (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃₀ (m ³ /s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	40	34.6	34.8	40.9	38.4
50%	31.8	27.0	27.7	32.3	30.6
85%	20.8	18	18.1	21.8	19.8
Mínimo		13.4			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (13 veces), seguido de junio (9 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió al de agosto (23.5 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 77 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 7.7 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 25**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

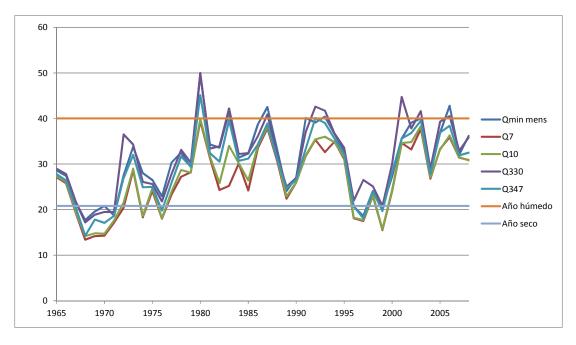


Figura 25.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Maipo en AIA San Alfonso (Fuente: Elaboración propia).



Considerando que en el tramo representado por esta AIA se produce descenso en rafting entre los meses de octubre y abril (CEA, 2008), se incluye información de los caudales medios mensuales característicos de año seco, normal y húmedo, además del caudal medio mensual para esta AIA, para ser utilizado a modo de comparación (ver **Acápite** 4.7.3).

Los resultados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17.- Caudales medios mensuales característicos en AIA San Alfonso (Fuente: * APR Ingeniería, 2013a. ** CONIC BF, 2008).

P. exc	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
15%*	87.0	148.8	244.5	235.2	164.3	99.6	65.5
50%**	59.4	107.0	133.8	113.6	81.3	60.5	42.7
85%*	44.6	75.3	97.7	83.1	61.9	43.3	31.5
Qmedio **	60.1	108.6	158.1	141.6	97.5	65.8	44.9

4.1.4 AIA Alfalfal

En la **Tabla 18** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Colorado en el sector el Alfalfal (hidrología actual, considerando efecto de central Alfalfal), considerando el período 1965 – 2008. El proceso de obtención de la serie de caudales se detalla en el **Anexo III.1**.

Tabla 18.- Caudales de estiaje en río Colorado en AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m³/s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	8.9	6.3	6.5	8.2	7.6
50%	6.6	5.2	5.3	6.5	5.9
85%	4.1	3.3	3.5	4.7	3.9
Mínimo		1.0			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (15 veces), seguido de septiembre y julio (13 y 12 veces, respectivamente). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió al de agosto y septiembre (4.8 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 20 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 2.0 m³/s.

CENTRO DE ECOLOGIA AFLICADA

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 26**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

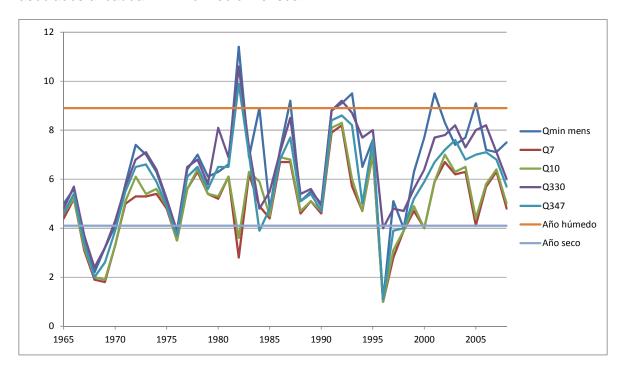


Figura 26.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Colorado en AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).



4.1.5 AIA Maitenes

En la **Tabla 19** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Colorado en el sector el Alfalfal (hidrología actual, considerando efecto de central Alfalfal), considerando el período 1965 – 2008. El proceso de obtención de la serie de caudales se detalla en el **Anexo III.1**.

Tabla 19.- Caudales de estiaje en río Colorado en AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m³/s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	16.3	14	14.2	16.1	14.9
50%	12.8	11.7	11.8	12.7	12.1
85%	9.3	8.3	8.8	9.4	8.8
Mínimo		4.6			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a mayo y agosto (10 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió al de julio (10 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 30 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 3.0 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 27**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.



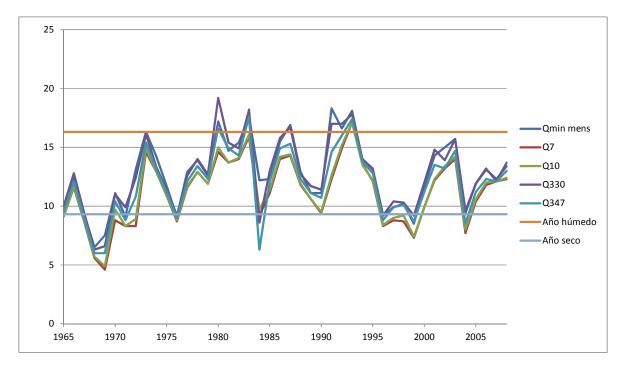


Figura 27.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Colorado en AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).

4.1.6 AIA Yeso

En la **Tabla 20** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Yeso en AIA Yeso (hidrología actual, incluyendo efecto de embalse Yeso), considerando el período 1965 – 2008. El proceso de obtención de la serie de caudales se detalla en el **Anexo III.1**.

Tabla 20.- Caudales de estiaje en río Yeso en AIA Yeso (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	5.0	4.9	4.9	5.3	5.0
50%	3.7	3.5	3.5	4.3	3.7
85%	1.9	1.7	1.7	2.6	1.9
Mínimo		1.0			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a septiembre (28 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió al de septiembre (2.0 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 10 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 1.0 m³/s.



La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 28**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

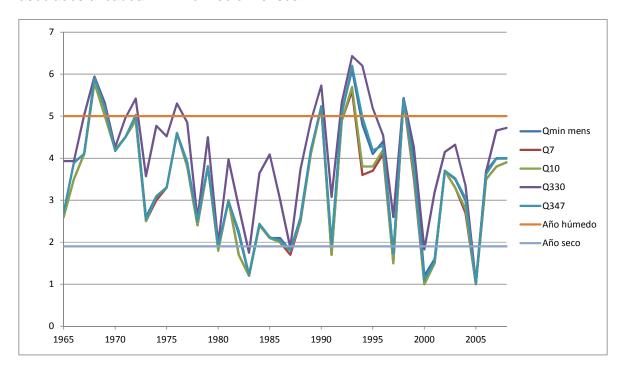


Figura 28.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Yeso en AIA Yeso (Fuente: Elaboración propia).

4.1.7 AIA Volcán

En la **Tabla 21** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del río Volcán en AIA Volcán (hidrología actual, incluyendo efecto de central Volcán), considerando el período 1965 – 2008. El proceso de obtención de la serie de caudales se detalla en el **Anexo III.1**.

Tabla 21.- Caudales de estiaje en río Volcán en AIA Volcán (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	1.80	1.70	1.70	1.80	1.80
50%	1.40	1.30	1.30	1.45	1.40
85%	0.70	0.60	0.60	0.60	0.60
Mínimo		0.60			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a mayo y junio (10 y 9 veces, respectivamente). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió a los mismos meses (0.9 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 9 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 0.9 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 29**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

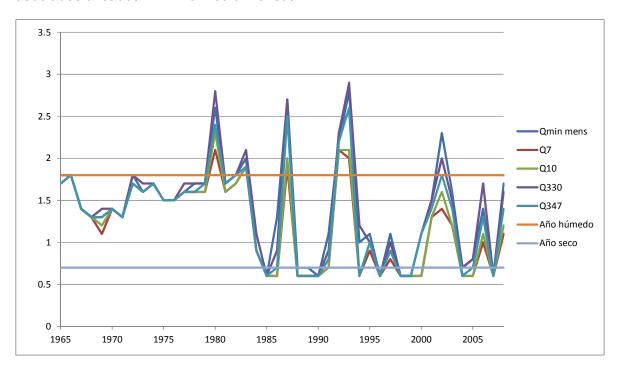


Figura 29.- Variación temporal de caudales de estiaje en río Volcán en AIA Volcán (Fuente: Elaboración propia).



4.1.8 AIA Colina

En la **Tabla 22** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del estero Colina en AIA Colina, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 22.- Caudales de estiaje en estero Colina en AIA Colina (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m³/s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	1.00	0.92	0.94	1.02	0.98
50%	0.85	0.79	0.79	0.86	0.83
85%	0.67	0.64	0.64	0.68	0.66
Mínimo		0.59			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (15 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió a los mismos meses (0.9 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 3.2 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 0.32 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 30**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

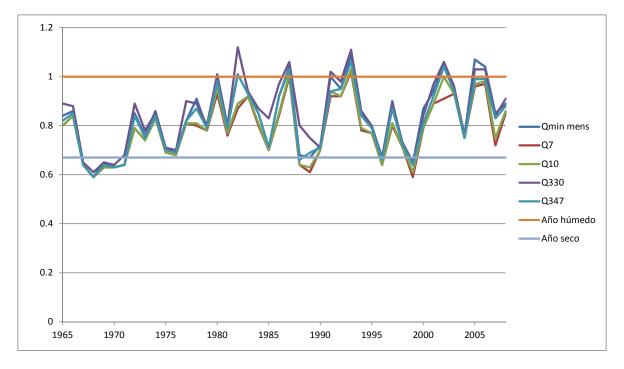


Figura 30.- Variación temporal de caudales de estiaje en estero Colina en AIA Colina (Fuente: Elaboración propia).



4.1.9 AIA Morado

En la **Tabla 23** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del estero Morado en AIA Morado, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 23.- Caudales de estiaje en estero Morado en AIA Morado (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	0.68	0.63	0.64	0.68	0.67
50%	0.56	0.52	0.53	0.58	0.55
85%	0.42	0.40	0.40	0.44	0.41
Mínimo		0.32			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (14 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió a agosto y julio (0.45 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 1.8 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 0.18 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 31**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

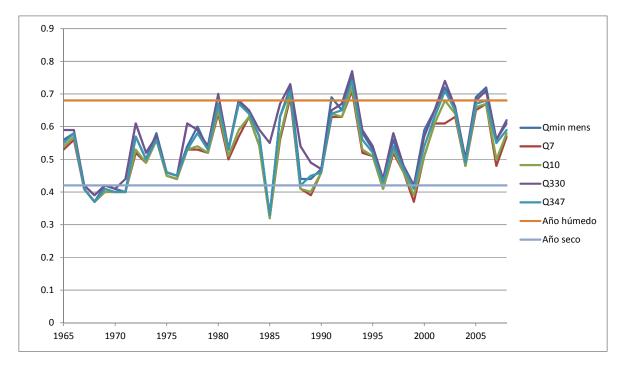


Figura 31.- Variación temporal de caudales de estiaje en estero Morado en AIA Morado (Fuente: Elaboración propia).



4.1.10 AIA Placas

En la **Tabla 24** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del estero las Placas en AIA Placas, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 24.- Caudales de estiaje en estero las Placas en AIA Placas (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14
50%	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12
85%	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09
Mínimo		0.08			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (15 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, se dio en el período julio – septiembre (0.10 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 0.5 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 0.05 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 32**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

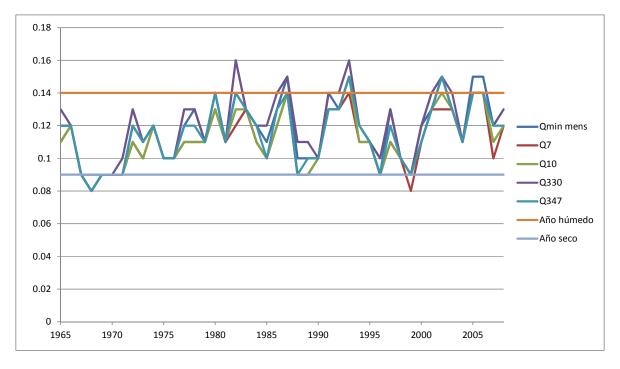


Figura 32.- Variación temporal de caudales de estiaje en estero las Placas en AIA Placas (Fuente: Elaboración propia).



4.1.11 AIA Engorda

En la **Tabla 25** se presenta un resumen con los caudales característicos de estiaje del estero Engorda en AIA Engorda, considerando el período 1965 – 2008.

Tabla 25.- Caudales de estiaje en estero Engorda en AIA Engorda (Fuente: Elaboración propia).

P. exc	Q _{min mens} (m³/s)	Q ₇ (m³/s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₃₃₀ (m³/s)	Q ₃₄₇ (m³/s)
15%	0.39	0.36	0.36	0.39	0.38
50%	0.32	0.29	0.30	0.33	0.31
85%	0.24	0.23	0.23	0.25	0.23
Mínimo		0.19			

Respecto al caudal mínimo mensual, el mes en el que este se repitió en más oportunidades correspondió a agosto (14 veces). El caudal mínimo medio mensual, para año seco, correspondió al mismo mes (0.25 m³/s).

Cabe destacar que el caudal medio anual en este tramo correspondió a 1.0 m³/s, siendo el 10% de este valor igual a 0.1 m³/s.

La variación temporal de los caudales de estiaje se presenta en la **Figura 33**. Para efecto de la presentación de resultados, se consideró los límites de año seco y húmedo a los asociados al caudal mínimo medio mensual.

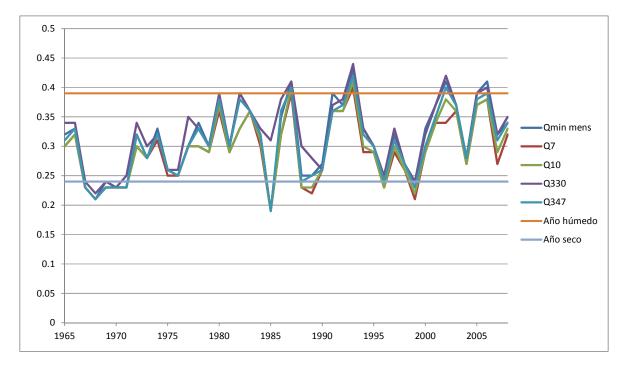


Figura 33.- Variación temporal de caudales de estiaje en estero Engorda en AIA Engorda (Fuente: Elaboración propia).



4.2 Resultados Análisis de Estacionariedad

Detalles de los resultados se presentan en el ANEXO III.4 Análisis de Estacionariedad.

En cuanto al análisis de la series mensuales se tiene que las PACF reportan que tanto la media, como la varianza, no cambian en el tiempo. Esto significa que las series de tiempo no presentan una tendencia o son no estacionarias.

En cuanto a las series anuales se tiene que las curvas ACF y PACF muestran que no existe un decaimiento hacia cero y ambas muestran un comportamiento sinusoidal. Esto indica que la estacionariedad es más bien débil.

Dado que la PACF presenta un decaimiento exponencial, tanto para los caudales medios mensuales como los caudales medios anuales, lo que significa, de acuerdo a Box y Jenkins, que las series tienen cierta estacionariedad. Para evaluar esto se procedió a aplicar varios test a las muestras.

Los test paramétricos y no paramétricos aplicados, indican primero, que todas las series provienen de una distribución continua de características gaussianas, cumpliendo el criterio de normalidad, y que, segundo, tanto los test paramétricos como no paramétricos reportan el cumplimiento de la hipótesis nula (las 2 muestras provienen de una misma distribución) en sus respectivos test, concluyéndose que tanto la media como la varianza de las series no presenta una variación estadísticamente significativa al 95% de confianza. Ambas muestras al ser similares en cuanto a sus estadísticos se puede afirmar que no presentan tendencia alguna, y por ello la estacionariedad es débil o de baja significancia.

El Test de Diferencias de Medias realizado a cada una de las series de tiempo, indica que alno existir que la media varía significativamente se cumple con el primer requisito de estacionariedad débil.

De acuerdo al Test de Fischer que indica que la varianza no varía significativamente se cumple con el segundo requisito de estacionariedad débil.

Por último respecto al análisis de tendencias mediante el test de Spearman, este encuentra valores positivos de correlación, pero aún no estadísticamente significativos al 95%. De los gráficos Box-Plot en que se aprecia que la variabilidad de las medianas no varian significativamente se corrobora lo obtenido en los test y se considera que la estacionariedad es débil y no existe tendencia alguna en las series de tiempo.

Finalmente se concluye que según los resultados de los diferentes test se tiene que las 5 series analizadas presentan una estacionariedad débil.



4.3 Calibración coeficiente de Manning

4.3.1 AIA Lajas

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente, salvo el perfil 1. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 26**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 27**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 26.- Ubicación de perfiles topobatimétricos de río Maipo en AIA Lajas (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubica	ción*	Cota pelo			Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6283499.2	368368.4	823.53	51.2	36.7	72.414	25/3
7	6283455.6	368384.1	823.30	42.1	39.8	72.390	25/3
6	6283425.5	368395.7	823.15	52.0	45.9	72.609	26/3
5	6283373.8	368412.8	822.85	43.5	37.9	72.128	26/3
4	6283332.6	368426.7	822.47	54.5	56.6	71.623	26/3
3	6283284.2	368445.8	822.04	32.2	42.6	73.197	26/3
2	6283246.4	368464.3	821.85	46.3	40.9	72.403	27/3
1	6283199.2	368484.4	821.19	-	-	s/a***	27/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. *** s/a = Sin aforo.

Tabla 27.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, Maipo en AIA Lajas (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.70	1.26	0.032
7	0.77	1.11	0.031
6	0.80	1.08	0.030
5	0.78	1.06	0.031
4	0.63	0.92	0.033
3	0.74	1.25	0.031
2	0.82	1.41	0.030
1	0.66	1.23	0.033

Dada la leve variación del caudal, para la calibración fue considerado el valor promedio, correspondiente a 72.395 m³/s (60% de probabilidad de excedencia de acuerdo a APR Ingeniería, S/Aa). Al respecto, cabe señalar que la diferencia entre el caudal máximo y el promedio corresponde a un 1.1% (para el caso del caudal mínimo, la proporción es aún menor). Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 0.83% y 2.26%, respectivamente.



Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 34** y **Figura 35** y en la **Tabla 28**. Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 34**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.0038 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.034 y 0.037 s/m^{1/3} (ver **Tabla 28**). El error medio obtenido para Δ n correspondió a 7 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 1.17 m, en términos medios el error fue de un 6%.

Tabla 28.- Resultados de calibración río Maipo en AIA Lajas ($\Delta n = 0.0038 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + ∆n (s/m ^{1/3})
8	1.26	1.34	0.08	6%	0.033
7	1.11	1.18	0.07	6%	0.032
6	1.08	1.04	0.04	3%	0.032
5	1.06	1.04	0.02	2%	0.032
4	0.92	1.01	0.09	10%	0.033
3	1.25	1.25	0.00	0%	0.033
2	1.41	1.26	0.15	11%	0.034
1	1.23	1.20	0.03	2%	0.034

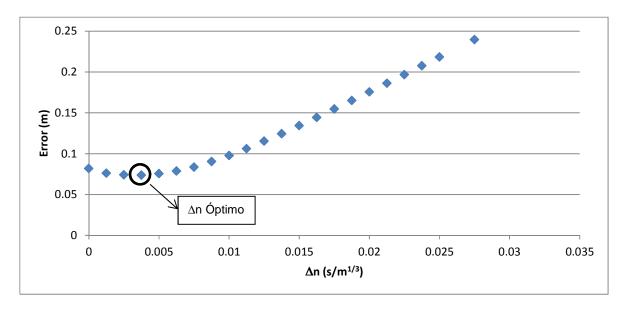


Figura 34.- Determinación de Δn en AIA Lajas (Fuente: Elaboración propia).

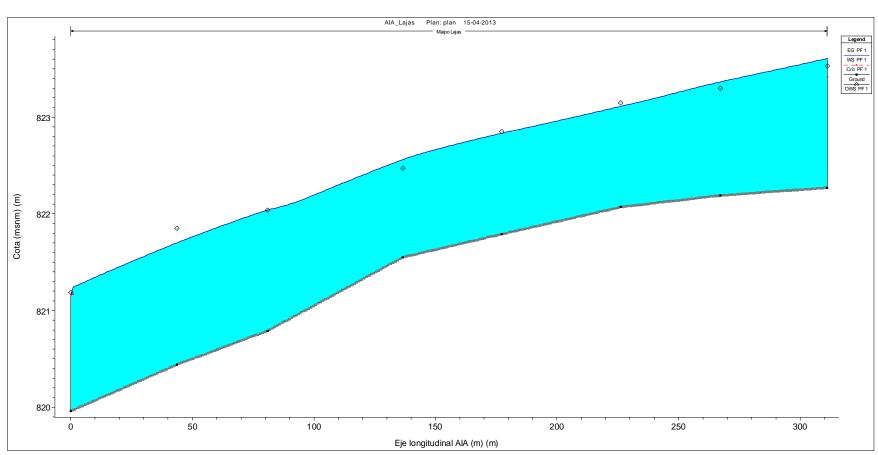


Figura 35.- Eje hidráulico modelado en AIA Lajas. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.2 AIA Toyo

En total fueron medidos 10 perfiles topobatimétricos, de los cuales solamente 3 presentaron aforos respectivos. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 29**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n_0 se presentan en la **Tabla 30**, .en tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 29.- Ubicación de perfiles topobatimétricos de río Maipo en AIA Toyo (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubica	ción*	Cota pelo		Distancia a perfil aguas Cau abajo (m) afor		Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6272509.6	375774.4	990.07	50.8	45.6	s/a***	s/a
7	6272552.4	375747.0	988.98	36.8	36.1	s/a	s/a
6	6272576.2	375719.0	988.35	37.5	36.3	s/a	s/a
5	6272598.0	375688.5	987.80	34.4	33.0	s/a	s/a
4	6272613.3	375657.7	987.53	36.7	42.1	s/a	s/a
3	6272628.6	375624.4	986.72	40.6	36.6	s/a	s/a
2	6272642.1	375586.1	986.43	44.9	48.7	s/a	s/a
1	6272656.1	375543.5	986.23	30.2	23.1	57.431	19/03
E2	6272664.7	375514.5	985.94	37.9	32.8	52.205	26/03
E1	6272678.0	375479.0	985.65	-	-	52.850	26/03

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. *** s/a = Sin aforo.

Tabla 30.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, Maipo en AIA Toyo.

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.59	0.95	0.043
7	0.93	1.71	0.036
6	0.83	1.75	0.038
5	1.03	1.68	0.034
4	1.02	1.55	0.035
3	1.09	1.58	0.034
2	1.09	1.47	0.034
1	1.07	1.39	0.034
E1	0.89	1.33	0.037
E2	0.81	1.4	0.038

Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

La calibración se diferenció en dos partes. Los 8 perfiles de aguas arriba fueron calibrados con el caudal aforado en el perfil 1, mientras que los perfiles E1 y E2 fueron calibrados con el valor promedio de sus aforos respectivos. Cabe destacar que el caudal fue superior a los caudales de estiaje incluso para años húmedos (ver **Tabla 14**), siendo levemente inferior al caudal de marzo con probabilidad de excedencia de 50% (ver **Tabla 15**).

Con respecto al uso del caudal aforado en el perfil 1 para la modelación de los perfiles 2 a 8, se debe señalar que no existe estación fluviométrica en el río Maipo que permita determinar con certeza los caudales en el sector del AIA Toyo durante la medición de los perfiles topobatimétricos no aforados. No obstante, la estación Maipo en San Alfonso se ubica a poco menos de 9 km aguas arriba, sin existir aportes significativos en la zona intermedia durante la fecha de medición. Aunque la estación no fue utilizada para determinar los caudales, se observó que el caudal medio en esta entre las 13:30 y las 17:30 del día 18/03 (horario de los aforos) fue igual a 50.965 m³/s, mientras que entre las 12:15 y las 16:30 del 19/03 fue de 50.324. Los caudales de la estación fluviométrica se presentan en **Anexo III.2**. Dado que la diferencia entre ambos fue del orden de un 1% de los caudales, se estimó que el caudal circulante en los 8 perfiles del sector del AIA Toyo fue similar. Así, para todos estos se utilizó el caudal aforado en el perfil 1.

Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 0.53% y 1.51%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 36** y **Figura 37** y en la **Tabla 31.** En la primera se muestran por separado y en conjunto la calibración del tramo de aguas arriba (perfiles 1 a 8) y de aguas abajo (perfiles E1 y E2). Se observa que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 36**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δn) igual a $0.02 \text{ s/m}^{1/3}$. Por otra parte, se destaca un cambio de tendencia de la curva de "error v/s Δn " para $\Delta n = 0.0163 \text{ s/m}^{1/3}$, debido a que para valores menores o iguales a este, el perfil 4 tiene escurrimiento supercrítico, mientras que para valores superiores (como por ejemplo, el óptimo de calibración), su escurrimiento es subcrítico, tal como el resto del tramo de la AIA. En la **Figura 37**, en tanto, se presenta el eje hidráulico con el caudal de calibración del tramo de aguas arriba, por lo que los valores del pelo de agua de los perfiles E1 y E2 no se corresponden con los calibrados.

El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.054 y 0.063 s/m^{1/3} (ver **Tabla 31**). El error medio obtenido para ∆n correspondió a 14 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 1.48 m, en términos medios el error fue de un 9.5%.



Tabla 31.- Resultados de calibración río Maipo en AIA Toyo ($\Delta n = 0.02 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	0.95	0.94	0.01	1%	0.059
7	1.71	1.61	0.10	6%	0.053
6	1.75	1.73	0.02	1%	0.053
5	1.68	1.76	0.08	5%	0.049
4	1.55	1.40	0.15	10%	0.052
3	1.58	1.72	0.14	9%	0.048
2	1.47	1.67	0.20	14%	0.047
1	1.39	1.49	0.10	7%	0.048
E1	1.33	1.45	0.12	9%	0.051
E2	1.4	1.52	0.12	9%	0.052

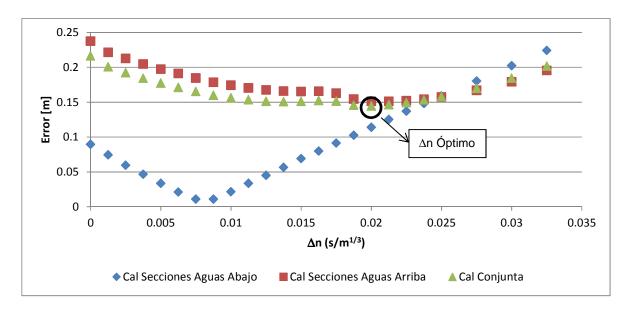


Figura 36.- Determinación de Δn, río Maipo en AIA Toyo (Fuente: Elaboración propia).

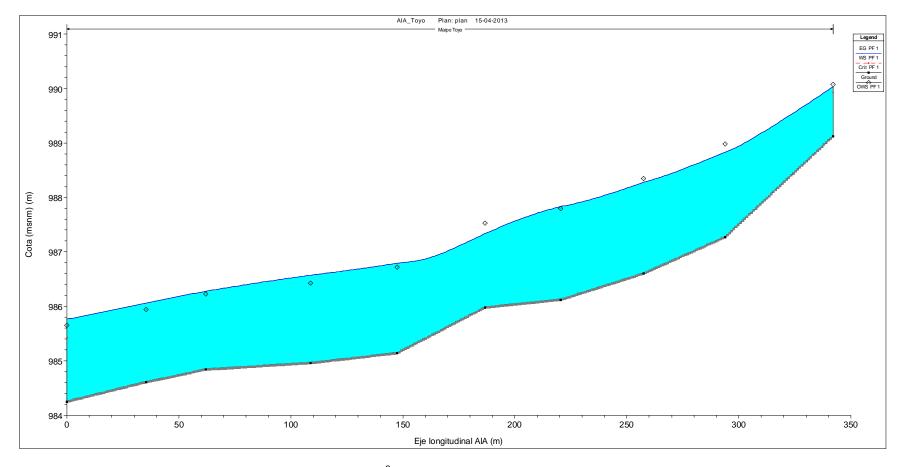


Figura 37.- Eje hidráulico modelado, para Q = 57.43 m³/s en AIA Toyo. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).

.



4.3.3 AIA San Alfonso

En total fueron medidos 5 perfiles topobatimétricos, debido a las dificultades técnicas expuestas en el Capítulo anterior. De los 5 perfiles medidos, solamente 2 contaron con aforos respectivos. No obstante, para la calibración fueron considerados los caudales medidos en la estación Maipo en San Alfonso, ubicada alrededor de 300 m aguas arriba de la AIA. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en el **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 32**.Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 33**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 32.- Ubicación de perfiles topobatimétricos de río Maipo en AIA San Alfonso (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Perfil Ubicación*		agua (m) *		Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (III)	ribera izq.		(m³/s)	(2013)		
8	6266641.3	379214.6	1072.95	29.1	42.7	58.783	26/3		
7	6266642.1	379185.5	1072.60	55.2	44.8	58.729	26/3		
6	6266624.1	379133.3	1071.35	22.1	41.7	s/a***	s/a		
5	6266617.5	379112.2	1070.99	43.5	47.7	s/a	s/a		
4	6266596.7	379074.1	1070.14	-	-	s/a	s/a		

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. En caso de perfil 4, pelo de agua promedio de canal principal. *** s/a = Sin aforo.

Tabla 33.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, Maipo en AIA San Alfonso (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.90	1.67	0.036
7	0.72	1.21	0.042
6	0.39	0.96	0.038
5	0.49	0.78	0.050
4	0.93 - 0.40*	1.76	0.040**

^{*} Cauce separado en dos brazos con diferencia de cota significativa. ** Valor de coeficiente de Manning corresponde a brazo principal.

Dado que solamente se contó con 2 aforos y considerando la existencia de la estación fluviométrica Maipo en San Alfonso, fueron utilizados estos datos para la calibración, habiendo sido obtenidos del sitio web de la DGA (www.dga.cl, ver Anexo III.2). Dado que la estación presentó algunas inconsistencias en la variación horaria de los caudales, como que (una variación de 1 cm en el nivel de agua, corresponde a un cambio en el caudal de 1,09 m³/s, por lo que un incremento precipitado del nivel lleva a un cambio brusco del caudal), se consideró un promedio de 4 horas de los valores aforados, en torno a la hora de medición del perfil topobatimétrico. La información respecto a los caudales utilizados para la calibración se resume en la Tabla 34, mientras que en la Figura 38 se presenta la variación horaria del caudal en la estación fluviométrica Maipo en San Alfonso.



Tabla 34.- Caudales utilizados para la calibración, AIA Maipo en AIA San Alfonso (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Día	Hora	Q aforado (m³/s)	Q DGA* (m³/s)	Diferencia (m³/s)	Diferencia (%)	Q brazo derecho perfil 4 (m³/s)
8	16-03-2013	14:24	58.783	50.86	7.93	16%	8.78
7	16-03-2013	17:15	58.729	51.66	7.07	14%	8.92
6	17-03-2013	16:17		53.29			9.20
5	20-03-2013	16:17		56.07			9.83
4	20-03-2013	17:12	12.935**	56.90			9.83

^{*} Fuente: www.dga.cl. ** Caudal corresponde a brazo derecho. De estos, de acuerdo al aforo, a lo menos 1.56 m3/s escurren desde este hacia el cauce principal. Así, el caudal aforado que escurre en el eje longitudinal del río por el cauce secundario sería de 11.373 m3/s.

El caudal del río Maipo en el sector San Alfonso durante el período de medición de perfiles correspondió a una probabilidad de excedencia de 52%, de acuerdo a la información incluida en APR Ingeniería (S/Aa) (**Anexo III.2**). Dado que la diferencia media entre el aforo y el caudal obtenido de la estación fluviométrica fue de un 14.6%, se consideró este valor para estimar el caudal que escurre por el brazo derecho, obteniéndose un valor igual a 9.83 m³/s.

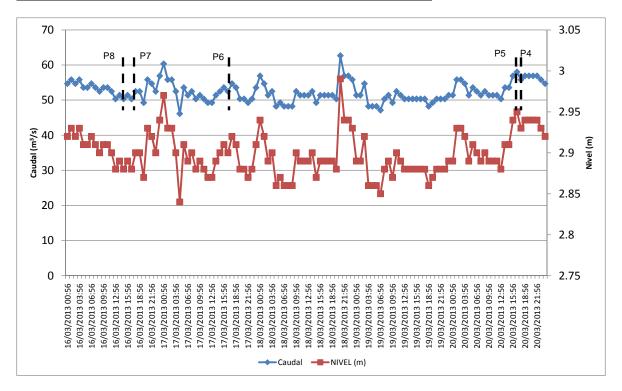


Figura 38.- Variación caudal horario y nivel de referencia en estación DGA río Maipo en San Alfonso. Líneas segmentadas indican horario y día de medición de perfil topobatimétrico.

Así como las condiciones de escurrimiento del río Maipo en este tramo impidieron generar una mayor cantidad de información referida a topobatimetría y aforos, también afectaron la calibración, ya que hubo dos perfiles que no pudieron ser bien representados por el modelo hidráulico. Tales perfiles correspondieron a los ubicados aguas abajo del tramo modelado (Perfiles 4 y 5). Esto se debería por una parte a la naturaleza del flujo y por otra a falta de información intermedia, dada la imposibilidad de medir más secciones. Con la información disponible, el modelo no fue capaz de reproducir una condición de escurrimiento supercrítico en el perfil 5, trasladando este error hacia aguas abajo, impidiendo a su vez una buena representación del perfil 4. Por otra parte, en este el escurrimiento sería subcrítico, por lo que faltaría un perfil medido en el tramo intermedio, que permita producir el cambio de régimen en el modelo.

Considerando lo anterior, aunque los perfiles 4 y 5 fueron mantenidos en los perfiles calibrados (y que posteriormente fueron utilizados en la modelación eco-hidráulica con HEC-RAS y PHABSIM) correspondieron exclusivamente a los perfiles 6 a 8.

Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 0.9% y 0.6%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la Figura 39 y Figura 40 y en la Tabla 35. Se obtuvo que el error mínimo (ver Ecuación 3 y Figura 39) se presentó para un



incremento del coeficiente de Manning (Δn) igual a 0.014 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.050 y 0.056 s/m^{1/3} (ver **Tabla 35**). El error medio obtenido para Δn correspondió a 11 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 3 secciones calibradas en la AIA fue de 1.58 m, en términos medios el error fue de un 7%.

Tabla 35.- Resultados de calibración río Maipo en AIA San Alfonso ($\Delta n = 0.0038 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	1.67	1.64	0.03	2%	0.050
7	1.21	1.1	0.11	9%	0.056
6	1.86	2.03	0.17	9%	0.052
5			Sin calibrar		
4			Sin calibrar		

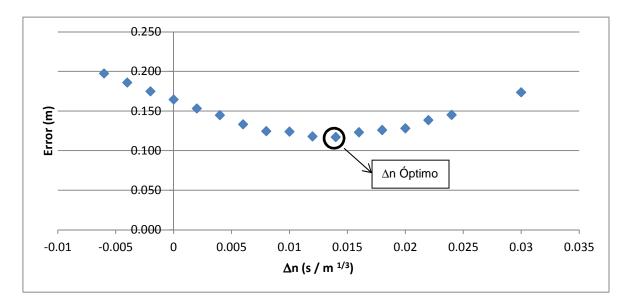


Figura 39.- Determinación de ∆n en AIA San Alfonso (Fuente: Elaboración propia).

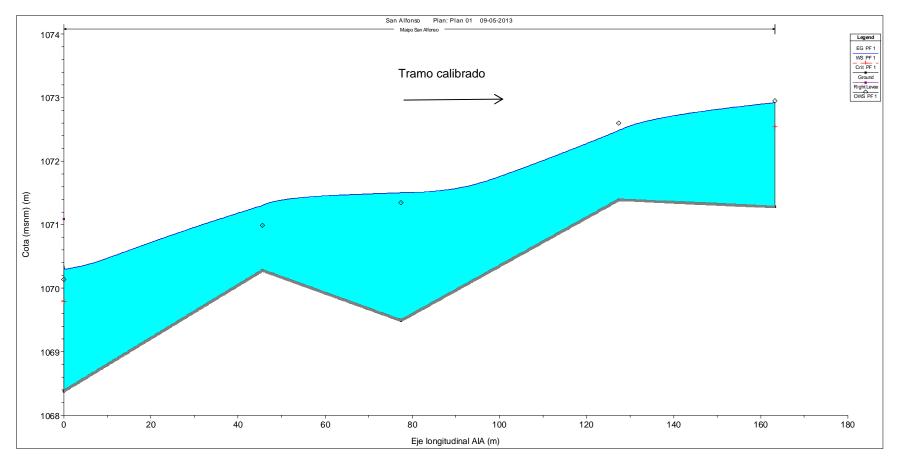


Figura 40.- Eje hidráulico modelado en AIA San Alfonso. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.4 AIA Alfalfal

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 36**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 37**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 36.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).

Perfil Ubicación*		Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo	
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6292146.3	388838.3	1316.61	17.18	22.48	6.226	23/3
7	6292134.7	388825.7	1316.36	21.69	20.94	6.235	23/3
6	6292117.6	388812.3	1315.98	22.06	23.94	6.202	23/3
5	6292100.2	388798.7	1315.75	24.12	22.8	6.271	23/3
4	6292080.9	388784.3	1315.38	22.45	22.93	6.254	23/3
3	6292064.1	388769.4	1315.05	17.61	19.25	6.221	23/3
2	6292050.9	388757.7	1314.62	21.3	22.95	6.299	23/3
1	6292034.9	388743.6	1314.04	-	-	6.298	23/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas.

Tabla 37.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.48	0.88	0.053
7	0.49	0.88	0.054
6	0.56	0.85	0.049
5	0.40	0.59	0.056
4	0.34	0.65	0.058
3	0.39	0.73	0.059
2	0.43	0.75	0.059
1	0.45	0.80	0.057

Para la calibración se consideró un caudal igual a 6.251 m³/s. Cabe destacar que la diferencia entre los caudales máximo y mínimo aforados, fue menor a un 2%. Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 1.20% y 2.61%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 41** y **Figura 42** y en la **Tabla 38**. Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 41**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.024 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.077 y 0.083 s/m^{1/3} (ver **Tabla 38**). El error medio obtenido para Δ n correspondió a 5.5 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de



escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 0.77 m, en términos medios el error fue de un 7.1%.

Tabla 38.- Resultados de calibración en AIA Alfalfal ($\Delta n = 0.024 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	0.88	0.88	0.00	0%	0.077
7	0.88	0.81	0.07	8%	0.078
6	0.85	0.89	0.04	5%	0.073
5	0.59	0.65	0.06	10%	0.080
4	0.65	0.73	0.08	12%	0.082
3	0.73	0.71	0.02	3%	0.083
2	0.75	0.69	0.06	8%	0.083
1	0.80	0.74	0.06	8%	0.081

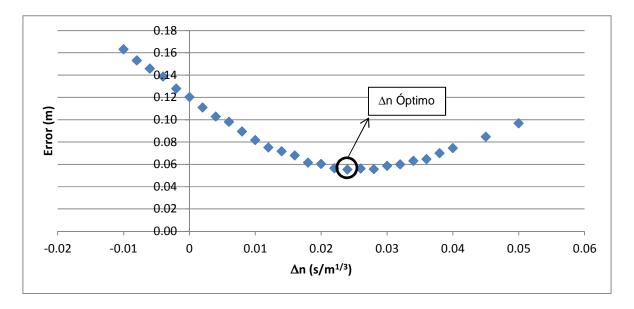


Figura 41.- Determinación de ∆n en AIA Alfalfal (Fuente: Elaboración propia).

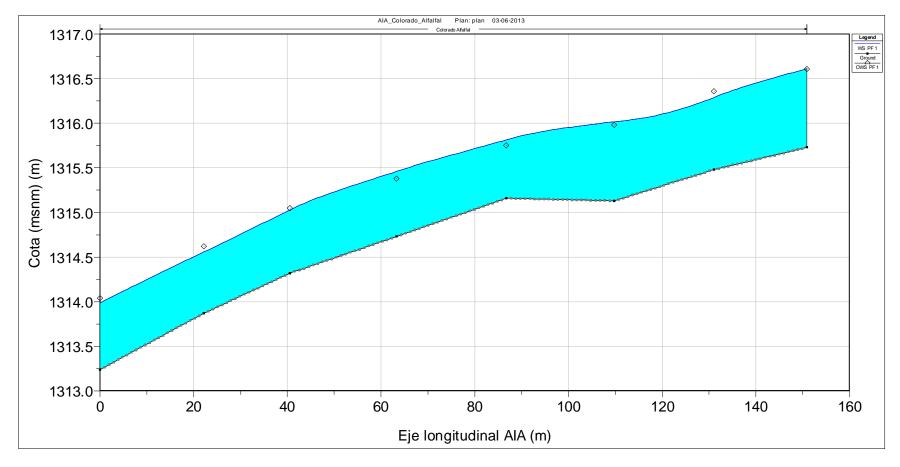


Figura 42.- Eje hidráulico modelado en AIA Alfalfal. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.5 AIA Maitenes

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 39**.. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 40**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 39.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Maitenes (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubicación*		Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6287349.7	380651.1	1072.94	25.04	23.57	s/a***	s/a
7	6287328.7	380637.5	1072.89	22.91	22.82	s/a	s/a
6	6287309.2	380625.5	1072.71	23.35	18.27	s/a	s/a
5	6287290.5	380611.6	1072.58	24.75	24.35	s/a	s/a
4	6287270.6	380596.9	1072.39	28.32	26.23	s/a	s/a
3	6287251.9	380575.6	1072.11	29.6	20	s/a	s/a
2	6287238.5	380549.2	1071.84	29.86	23.92	18.515	22/3
1	6287230.3	380520.5	1071.46	0	0	s/a	s/a

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. *** Sin aforo.

Tabla 40.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Maitenes (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.63	1.06	0.043
7	0.69	0.94	0.043
6	0.60	0.87	0.045
5	0.68	0.89	0.043
4	0.59	0.83	0.045
3	0.53	0.75	0.047
2	0.48	0.94	0.050
1	0.54	0.92	0.051

Los perfiles 4 a 8 fueron medidos el 21 de marzo, (entre 11:00 y 15:30 horas) mientras que los restantes se midieron durante el 22 de marzo (entre 14:30 y 18:00 horas), día para el cual se contó con el exclusivo aforo.

Aproximadamente 10 km aguas abajo de la AIA se encuentras la estación fluviométrica "Río Colorado antes junta río Maipo". Para estimar los caudales circulantes por el río Colorado durante la campaña de levantamiento topobatimétrico, fueron utilizados los flujos medidos por dicha estación. Se verificó que los caudales en la estación DGA durante todo el período de medición del día 21 de marzo estuvieron en torno a 19.176 m³/s, mientras que durante el 22 de marzo variaron en torno a 18.161 m³/s (Ver **Anexo**



III.2). Por otra parte, se compararon el caudal aforado con el medido en la estación a la misma hora, presentando una diferencia de 0.15 m³/s, correspondiente a menos del 1% del valor aforado. Por este motivo, y considerando que las condiciones de aforo en la estación DGA son mejores que las existentes en el punto de aforo, fueron utilizados los valores medidos por esta para la calibración, dividiéndola en dos tramos, asociados a la fecha en que fueron medidos los perfiles. Así, para los perfiles 4-8 se consideró un caudal de 19.176 m³/s, mientras que para los perfiles 1-3 el caudal fue de 18.161 m³/s. Es importante destacar que se determinó n₀ para todos los perfiles para ambos caudales, resultando diferencias en torno al 1% en los distintos perfiles (por ejemplo, para el perfil 8 el valor de n0 obtenido para el caudal 19.176 m³/s difirió en un 0.8% del valor de n0 obtenido para el caudal 18.161 m³/s).

Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 0.17% y 1.54%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 43** y **Figura 44** y en la **Tabla 41**. Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 43**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a -0.006 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.037 y 0.045 s/m^{1/3} (ver **Tabla 41**). El error medio obtenido para Δ n correspondió a 5.0 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 0.9 m, en términos medios el error fue de un 5.5%. Se debe señalar que la obtención de un valor negativo de Δ n podría ser indicio de una sobreestimación de los diámetros característicos del río en el tramo evaluado.

Tabla 41.- Resultados de calibración en AIA Maitenes ($\Delta n = -0.006 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	1.06	1.121	0.06	6%	0.037
7	0.94	0.917	0.02	2%	0.037
6	0.87	0.87	0.00	0%	0.039
5	0.89	0.887	0.00	0%	0.037
4	0.83	0.826	0.00	0%	0.039
3	0.75	0.777	0.03	4%	0.041
2	0.94	0.918	0.02	2%	0.044
1	0.92	0.802	0.12	13%	0.045

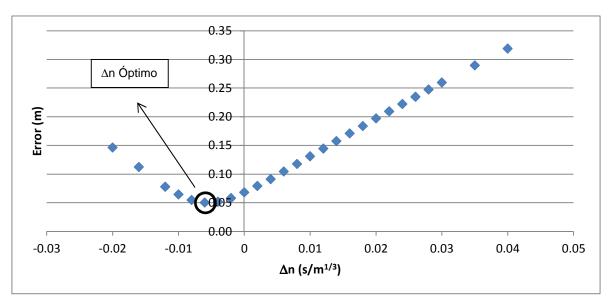


Figura 43.- Determinación de Δn en AIA Maitenes (Fuente: Elaboración propia).

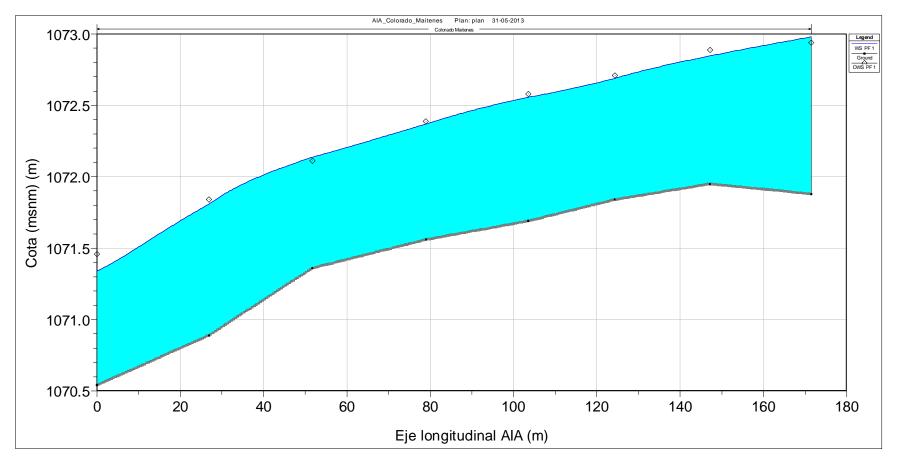


Figura 44.- Eje hidráulico modelado en AIA Maitenes. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde al de aguas arriba.



4.3.6 AIA Yeso

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 42**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 43**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 42.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Yeso (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Perfil Ubicación*		Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6262344.3	391483.3	1497.52	26.95	25.47	6.925	25/3
7	6262317.3	391483.7	1496.82	30.42	27.33	7.545	25/3
6	6262288.0	391475.5	1495.75	12.19	14.41	6.851	25/3
5	6262276.1	391472.7	1495.44	29.79	23.19	6.774	25/3
4	6262250.7	391457.2	1494.53	16.31	20.09	7.056	25/3
3	6262237.0	391448.4	1494.23	39.57	47.68	6.961	25/3
2	6262197.4	391447.0	1492.99	18.91	17.52	6.817	25/3
1	6262179.1	391442.5	1492.30	-	-	6.549	25/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas.

Tabla 43.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Yeso (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.43	0.69	0.049
7	0.56	0.85	0.048
6	0.49	0.92	0.046
5	0.46	0.63	0.049
4	0.41	0.72	0.047
3	0.37	0.59	0.050
2	0.35	0.76	0.055
1	0.38	0.69	0.054

Para la calibración se consideró un caudal igual a 6.935 m³/s, (en condiciones de régimen natural, para el sector de la bocatoma proyectada, este caudal corresponde a un 48% de probabilidad de excedencia, de acuerdo a APR Ingeniería, S/Aa). Cabe destacar que la diferencia entre el caudal medio y el máximo y mínimo fue de un 8% aproximadamente. Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 2.64% y 3.74%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 45** y **Figura 46** y en la **Tabla 44.** Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 45**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.04 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning



en la AIA varió entre 0.083 y 0.090 s/m $^{1/3}$ (ver **Tabla 44**). El error medio obtenido para Δn correspondió a 7.0 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 0.73 m, en términos medios el error fue de un 9.6%.

Tabla 44.- Resultados de calibración en AIA Yeso ($\Delta n = 0.04 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	0.69	0.69	0.00	0%	0.085
7	0.85	0.72	0.14	16%	0.084
6	0.92	0.94	0.01	2%	0.083
5	0.63	0.60	0.03	4%	0.084
4	0.72	0.84	0.12	17%	0.082
3	0.59	0.64	0.05	8%	0.086
2	0.76	0.69	0.00	0%	0.090
1	0.69	0.72	0.14	16%	0.089

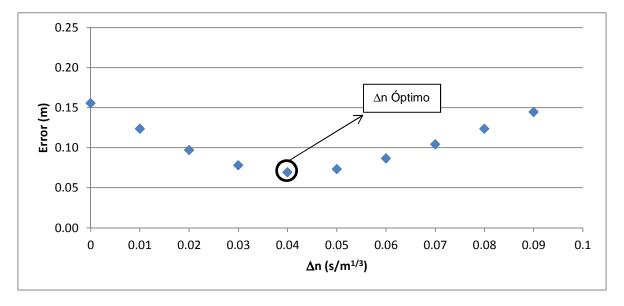


Figura 45.- Determinación de ∆n en AIA Yeso (Fuente: Elaboración propia).

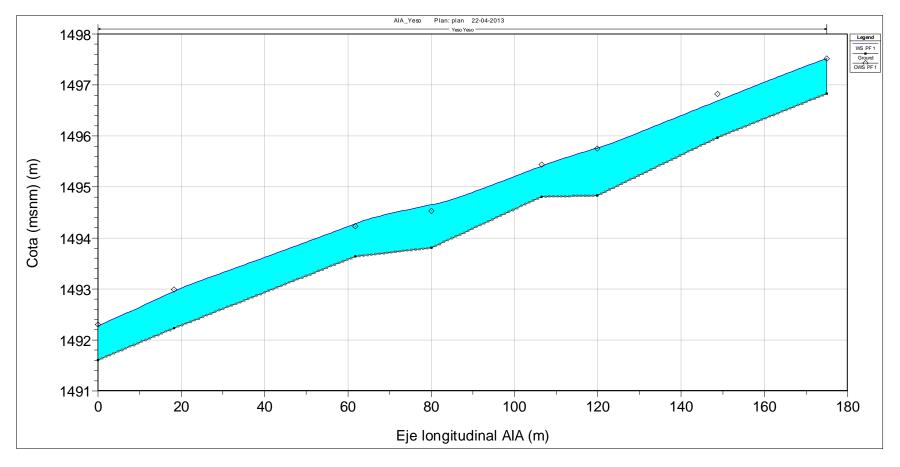


Figura 46.- Eje hidráulico modelado en AIA Yeso. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.7 AIA Volcán

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 45**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 46**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 45.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Volcán (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubica	ición*	Cota pelo agua (m) **			Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (III)	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6257951.5	388549.7	1307.06	17.62	17.38	1.221	23/3
7	6257958.6	388533.5	1307.01	19.94	19.88	1.223	23/3
6	6257964.7	388514.5	1306.69	18.68	18.25	1.219	23/3
5	6257973.6	388498.1	1306.49	16.26	16.3	1.236	23/3
4	6257983.0	388484.9	1306.27	19.36	16.49	1.263	23/3
3	6257994.8	388469.5	1305.75	21.75	24.34	1.220	23/3
2	6258005.3	388450.5	1305.33	16.73	14.74	1.241	23/3
1	6258015.8	388437.5	1304.98	-	-	1.226	23/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas.

Tabla 46.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Volcán (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.27	0.83	0.059
7	0.19	0.55	0.072
6	0.21	0.31	0.068
5	0.16	0.31	0.073
4	0.17	0.34	0.073
3	0.30	0.58	0.063
2	0.19	0.42	0.073
1	0.18	0.34	0.073

En los perfiles 3 y 4 se apreció una diferencia importante entre el perfil topobatimétrico y el obtenido por medio del aforo (Ver **Anexos I y II**). En ambos casos se optó por utilizar el perfil aforado en vez del topobatimétrico, considerando que con este último no se obtuvo una calibración satisfactoria. En la **Figura 47**, a modo de ejemplo, se muestra una comparación entre el perfil topobatimétrico y el perfil aforado para el caso del perfil 4. Para los perfiles restantes, dado que hubo similitud entre los perfiles de aforo y los topobatimétricos, fueron utilizados estos últimos.

Para la calibración se consideró un caudal igual a 1.231 m³/s, caudal del orden de los caudales medios mensuales mínimos de un año seco (entre abril y septiembre, ver APR



Ingeniería S.Aa, 2013). Cabe destacar que la diferencia entre los caudales máximo y mínimo aforados, fue del orden de 1% - 2%. Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 0.33% y 2.22%, respectivamente.

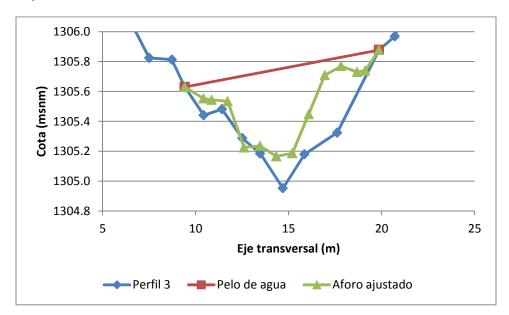


Figura 47.- Comparación perfil 4 topobatimétrico y de aforo.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 48** y **Figura 49** y en la **Tabla 47** se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 48**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.004 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.063 y 0.077 s/m^{1/3} (ver **Tabla 47**). El error medio obtenido para Δ n correspondió a 4.0 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 0.46 m, en términos medios el error fue de un 8.7%.

Tabla 47.- Resultados de calibración en AIA Volcán ($\Delta n = 0.004 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	0.83	0.90	0.07	8%	0.063
7	0.55	0.56	0.01	2%	0.076
6	0.31	0.33	0.02	6%	0.072
5	0.31	0.34	0.03	10%	0.077
4	0.34	0.32	0.02	6%	0.077
3	0.58	0.50	0.08	14%	0.067
2	0.42	0.42	0	0%	0.077
1	0.34	0.35	0.01	3%	0.077

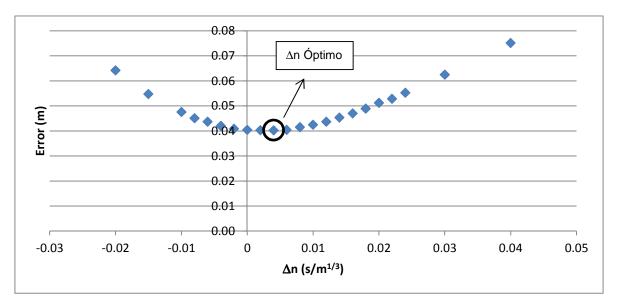


Figura 48.- Determinación de ∆n en AIA Volcán (Fuente: Elaboración propia).

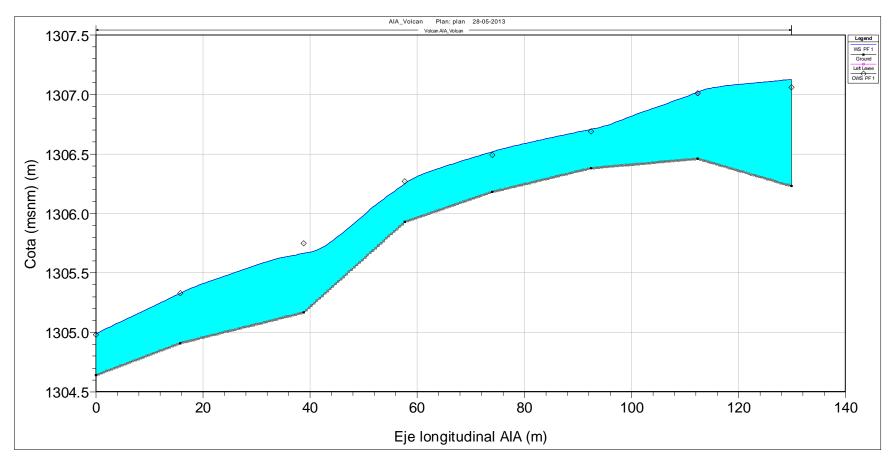


Figura 49.- Eje hidráulico modelado en AIA Volcán. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.8 AIA Colina

En total fueron medidos 9 perfiles topobatimétricos, de los cuales en 7 se realizó su aforo correspondiente. Cabe destacar que al ubicarse el perfil 4 en un tramo correspondiente a un salto de agua, fue incorporado un nuevo perfil aguas abajo (perfil 4a), no siendo realizado aforo en estos perfiles. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I y II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 48**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 49**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 48.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Colina (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Perfil Ubicación*		Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6259731.6	406906.3	2512.56	11.67	10.82	1.398	24/3
7	6259733.6	406894.8	2512.24	10.93	10.18	1.307	24/3
6	6259736.3	406884.2	2512.04	9.40	8.34	1.345	24/3
5	6259739.3	406875.3	2511.85	7.97	6.07	1.395	24/3
4	6259743.8	406868.7	2511.53	1.79	2.49	s/a***	s/a
4a	6259745.2	406867.6	2511.24	6.54	4.70	s/a	s/a
3	6259751.5	406866.0	2511.09	4.71	5.29	1.336	24/3
2	6259755.7	406863.8	2510.81	8.13	9.44	1.361	24/3
1	6259762.5	406859.3	2510.41	-	-	1.310	24/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. *** s/a = Sin aforo.

Tabla 49.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Colina (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.25	0.45	0.078
7	0.28	0.41	0.075
6	0.23	0.32	0.078
5	0.22	0.32	0.078
4	0.17	0.41	0.078
4a	0.55	0.89	0.062
3	0.30	0.50	0.078
2	0.21	0.50	0.078
1	0.20	0.48	0.078

Para la calibración se consideró un caudal igual a 1.35 m³/s, (58% de probabilidad de excedencia de acuerdo a APR Ingeniería, S/Aa). Cabe destacar que la diferencia entre el caudal promedio (utilizado para la calibración) y los caudales máximo y mínimo aforados fue del orden de un 3%. Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 4.26% y 2.84%, respectivamente.



Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 50** y **Figura 51** y en la **Tabla 50**. Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 50**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.002 s/m^{1/3}. Cabe destacar que el perfil 4a no fue considerado para la calibración, ya que la pendiente existente en el tramo P4-P4a es de un 36%, por lo que el software no es capaz de representar de buena forma el eje hidráulico. En la **Figura 51** se presenta la calibración con y sin su consideración. En esta última también puede apreciarse la inestabilidad del modelo para Δ n negativos, asociado a la representación del perfil 1. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.077 y 0.80 s/m^{1/3} (ver **Tabla 50**). El error medio obtenido para Δ n correspondió a 4.4 cm. Dado que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones consideradas en la calibración fue de 0.42 m, en términos medios el error fue de un 10%.

Tabla 50.- Resultados de calibración en AIA Colina ($\Delta n = 0.002 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	0.45	0.44	0.01	2%	0.080
7	0.41	0.44	0.03	7%	0.077
6	0.32	0.36	0.04	13%	0.080
5	0.32	0.28	0.04	13%	0.080
4	0.41	0.36	0.05	12%	0.080
4a	0.89	0.74	-	-	
3	0.50	0.42	0.08	16%	0.080
2	0.50	0.49	0.01	2%	0.080
1	0.48	0.54	0.06	13%	0.080

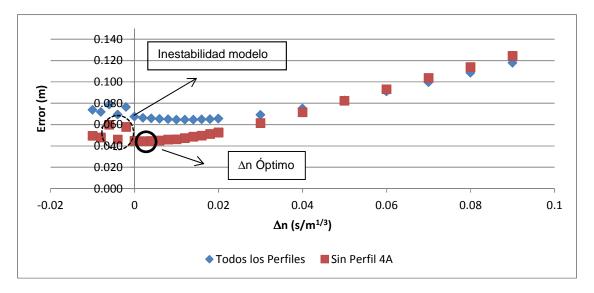


Figura 50.- Determinación de Δn en AIA Colina. En rojo se presentan resultados sin considerar perfil 4a. Además, se aprecia para Δn negativos inestabilidad del modelo (en perfil 1) (Fuente: Elaboración propia).

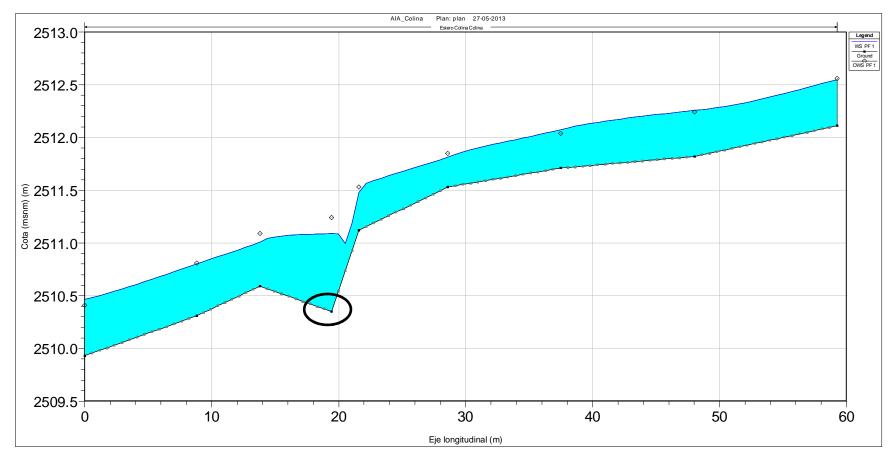


Figura 51.- Eje hidráulico modelado en AIA Colina. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba. Circunferencia indica perfil eliminado de calibración y no considerado en modelación de hábitat (ver capítulo de modelación del hábitat) (Fuente: Elaboración propia).



4.3.9 AIA Morado

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 51**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 52**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 51.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Morado (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubica	ción*	Cota pelo			Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6260473.2	405734.4	2466.24	10.4	13.1	1.458	24/3
7	6260463.3	405737.6	2465.94	10.9	12.5	1.438	24/3
6	6260453.9	405743.2	2465.65	9.6	9.1	1.464	24/3
5	6260447.7	405750.4	2465.33	10.1	11.2	1.459	24/3
4	6260441.3	405758.2	2465.05	8.5	6.9	1.441	24/3
3	6260434.8	405763.7	2464.84	12.7	12.0	1.434	24/3
2	6260423.4	405769.2	2464.48	9.3	9.4	1.457	24/3
1	6260415.4	405774.0	2464.18	-	-	1.460	24/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas.

Tabla 52.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Morado (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.21	0.33	0.049
7	0.26	0.38	0.046
6	0.22	0.30	0.049
5	0.22	0.51	0.048
4	0.21	0.40	0.052
3	0.3	0.58	0.044
2	0.29	0.48	0.047
1	0.23	0.35	0.049

Para la calibración se consideró un caudal igual a 1.46 m³/s, (39% de probabilidad de excedencia de acuerdo a APR Ingeniería, S/Aa). Cabe destacar que la diferencia entre los caudales máximo y mínimo aforados, fue del orden de un 2%. Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 2.57% y 3.22%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 52** y **Figura 53** y en la **Tabla 53**. Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 52**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.04 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.089 y 0.092 s/m^{1/3} (ver **Tabla 53**). El error medio obtenido para Δ n



correspondió a 3.6 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 0.41 m, en términos medios el error fue de un 8.5%.

Tabla 53.- Resultados de calibración en AIA Morado ($\Delta n = 0.04 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + ∆n (s/m ^{1/3})
8	0.33	0.38	0.05	15%	0.089
7	0.38	0.42	0.04	10%	0.086
6	0.30	0.33	0.02	7%	0.089
5	0.51	0.52	0.01	2%	0.088
4	0.40	0.39	0.01	2%	0.092
3	0.58	0.50	0.07	13%	0.084
2	0.48	0.46	0.02	5%	0.087
1	0.35	0.36	0.01	2%	0.089

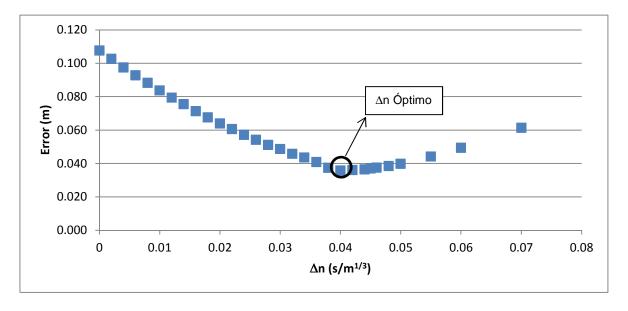


Figura 52.- Determinación de ∆n en AIA Morado (Fuente: Elaboración propia).

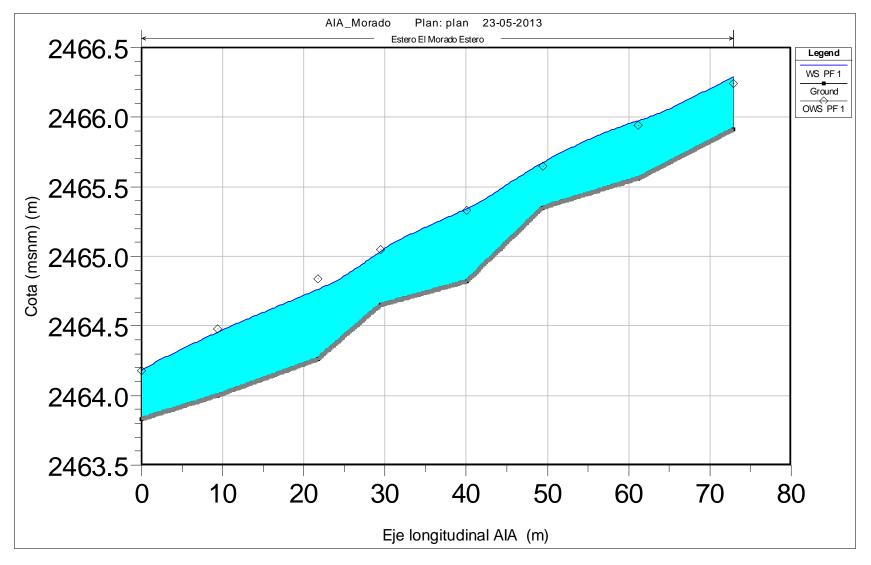


Figura 53.- Eje hidráulico modelado en AIA Morado. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.10 AIA Placas

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. Cabe destacar que la no hubo información topobatimétrica de detalle dentro del cauce del estero. Por este motivo, para la calibración y modelación del eje hidráulico fue utilizada la sección transversal del aforo, cómo sección transversal del cauce, intersectándose con la información topobatimétrica en la ribera. En la **Figura 54** se ejemplifica lo indicado anteriormente, para el caso del perfil 3. El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**, mientras que en el **Anexo IV.2** se presentan los modelos hidráulicos utilizados. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presentan en la **Tabla 54**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ se presentan en la **Tabla 55**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

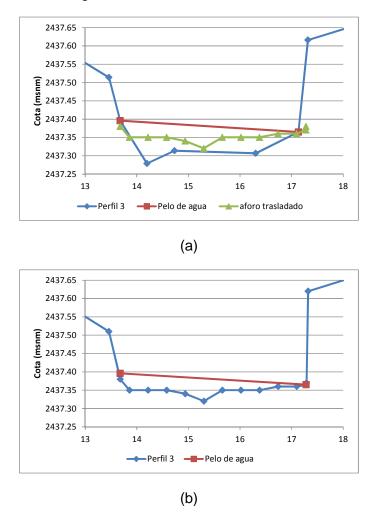


Figura 54.- Sección transversal de perfil 3 en AIA Placas. En (a) se presentan los perfiles topobatimétrico y de aforo, mientras que en (b) se muestra la sección considerada en el modelo hidráulico, correspondiente al perfil de aforo en el tramo ubicado por debajo del pelo de aqua.



Tabla 54.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Placas (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubica	ción*	Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6260299.2	406153.2	2438.37	8.9	10.9	0.020	24/3
7	6260294.0	406145.9	2437.94	7.5	7.5	0.019	24/3
6	6260289.1	406140.2	2437.79	6.8	6.8	0.019	24/3
5	6260285.2	406134.4	2437.67	8.6	8.6	0.019	24/3
4	6260280.5	406127.1	2437.51	7.8	7.8	0.018	24/3
3	6260276.5	406120.6	2437.38	10.9	10.9	0.019	24/3
2	6260271.5	406111.2	2437.09	8.1	8.1	0.018	24/3
1	6260266.3	406105.0	2437.00	-	-	0.019	24/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. *** s/a = Sin aforo.

Tabla 55.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Placas (Fuente: Elaboración propia)*.

Perfil	Radio hidráulico sección transversal (m)	Altura media cauce principal (m)	Profundidad de escurrimiento (m)
8	0.040	0.070	0.110
7	0.060	0.100	0.122
6	0.050	0.070	0.113
5	0.038	0.03	0.046
4	0.038	0.04	0.055
3	0.028	0.04	0.061
2	0.047	0.055	0.058
1	0.010	0.03	0.048

Dada la leve variación del caudal, para la calibración fue considerado el valor promedio, correspondiente a 0.019 m³/s (el caudal medio diario mínimo histórico corresponde a 0.066 m³/s, de acuerdo a APR Ingeniería, S/Aa). Las condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 4.4% y 0.9%, respectivamente.

Cabe destacar que se evaluaron diferentes forma de estimar el coeficiente de Manning. Esto, debido a que no se cumplió con la relación Rh/ds <1, por la baja altura de escurrimiento. Por tanto, dado que parte del sedimento grueso quedó fuera del agua, se definió Rh/ds =1. Debido a que la altura de escurrimiento fue baja, hubo en algunas secciones una clara separación entre un cauce principal y uno secundario (a modo de ejemplo, remitirse a **Anexos II y IV.2** y ver perfiles 8 y 6).

Considerando lo señalado en el párrafo anterior, se definieron 4 formas diferentes de resolver el problema, en relación a la definición del diámetro característico del sedimento: a) ds = 0.1779 (m); b) ds = Rh; c) ds = Rh de cauce principal (estimado como la altura media de escurrimiento en el cauce principal); d) ds = Hmax.

Para cada una de estas formas se obtuvo un valor de n_0 diferente. Sin embargo, esta diferencia fue compensada por la magnitud de Δn , obteniéndose resultados similares para los 4 casos. La **Tabla 56** muestra un resumen de la comparación.

Tabla 56.- Resultados de calibración para 4 métodos considerados, AIA Placas (Fuente: Elaboración propia)*.

	n ₀ (s/m ^{1/3})			$n_0 + \Delta n (s/m^{1/3})$				
Perfil	ds a)	ds b)	ds c)	ds d)	ds a)	ds b)	ds c)	ds d)
8	0.073	0.057	0.062	0.067	0.087	0.091	0.090	0.093
7	0.073	0.061	0.066	0.068	0.087	0.095	0.094	0.094
6	0.073	0.059	0.062	0.067	0.087	0.093	0.090	0.093
5	0.073	0.053	0.053	0.058	0.087	0.087	0.081	0.084
4	0.073	0.054	0.057	0.060	0.087	0.088	0.085	0.086
3	0.073	0.054	0.057	0.061	0.087	0.088	0.085	0.087
2	0.073	0.059	0.060	0.060	0.087	0.093	0.088	0.086
1	0.073	0.054	0.054	0.058	0.087	0.088	0.082	0.084

Se puede observar que hubo una baja diferencia entre los 4 casos, no superando el 10% la diferencia entre los coeficientes de Manning máximo y mínimo en ningún perfil. Considerando las formas de fondo, dada la magnitud del caudal de calibración, se optó por considerar el método c) para la calibración, asignándole al cauce principal el mayor efecto en los que respecta a la resistencia al flujo.

Los resultados se presentan en la **Figura 55** y **Figura 56** y en la **Tabla 57**. El error mínimo se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δn) igual a 0.028 s/m^{1/3}. De este modo, el coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.081 y 0.095 s/m^{1/3} (ver Tabla 57). El error medio obtenido para Δn correspondió a 1.17 cm. Al respecto, se debe destacar que el perfil 1 no pudo ser bien representado por la modelación, posiblemente debido a la condición modelada de bajos caudales, altura de escurrimiento y pendiente media del cauce, por lo que no fue considerado en los resultados. Dado que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 7 secciones consideradas en la calibración fue de 8.1 cm, en términos medios el error fue de un 14%.



Tabla 57.- Resultados de calibración en AIA Placas ($\Delta n = 0.028 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
8	0.110	0.099	0.011	10%
7	0.122	0.107	0.015	12%
6	0.113	0.112	0.001	1%
5	0.046	0.064	0.018	39%
4	0.055	0.071	0.016	29%
3	0.061	0.057	0.004	7%
2	0.058	0.060	0.002	3%
1	0.048	-	-	-

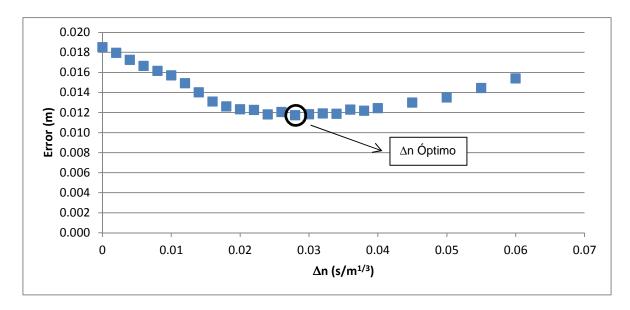


Figura 55.- Determinación de ∆n en AIA Placas (Fuente: Elaboración propia).

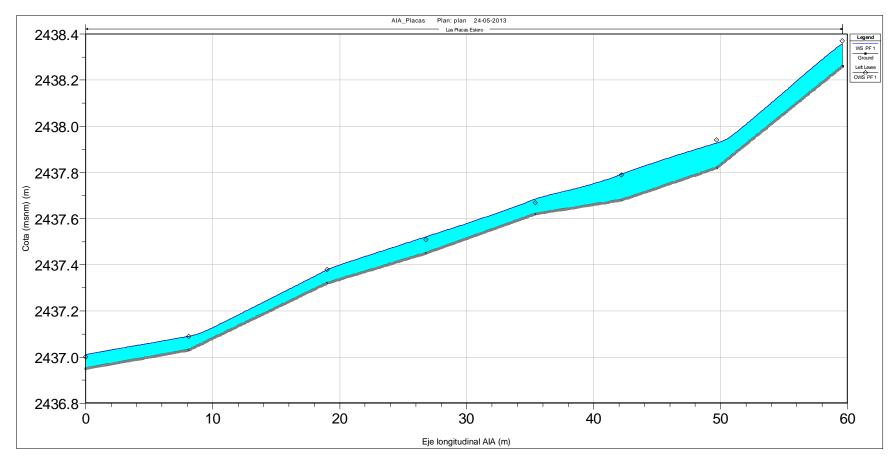


Figura 56.- Eje hidráulico modelado en AIA Placas. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.3.11 AIA Engorda

En total fueron medidos 8 perfiles topobatimétricos, cada uno con su aforo correspondiente. Cabe destacar que la información topobatimétrica fue medida fuera del cauce. Por este motivo, para la calibración y modelación del eje hidráulico fue utilizada la sección transversal del aforo, cómo sección transversal del cauce, intersectándose con la información topobatimétrica en la ribera (similar al caso descrito para el AIA Placas). El detalle de cada uno de los puntos medidos se presenta en los **Anexos I** y **II**. La ubicación espacial de cada perfil, la distancia entre los mismos y el caudal aforado se presenta en la **Tabla 58**. Los valores medidos de radio hidráulico y de n₀ considerando el eje hidráulico y la relación de macrorugosidad de Ayala y Oyarce (1993) (citado en Niño, 2005), se presentan en la **Tabla 59**. En tanto, el tamaño característico del sedimento grueso se obtuvo de la **Tabla 8**.

Tabla 58.- Ubicación de perfiles topobatimétricos en AIA Engorda (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Ubicación*		Cota pelo	Distancia a perfil aguas abajo (m)		Caudal aforado	Fecha aforo
	N (UTM)	E (UTM)	agua (m) **	ribera izq.	ribera der.	(m³/s)	(2013)
8	6259445.4	407081.4	2509.47	4.93	6.89	0.743	24/3
7	6259445.0	407076.4	2509.09	4.11	3.7	0.713	24/3
6	6259442.8	407073.0	2508.88	4.5	4.29	0.785	24/3
5	6259440.7	407069.0	2508.78	7.57	8.28	0.762	24/3
4	6259438.9	407061.7	2508.47	5.9	5.7	0.723	24/3
3	6259437.1	407056.1	2508.27	4.62	4.86	0.772	24/3
2	6259434.5	407052.3	2507.98	6.68	6.11	0.751	24/3
1	6259431.7	407046.2	2507.78	-	-	0.759	24/3

^{*} Ubicación pelo de agua en orilla de ribera izquierda. ** Pelo de agua promedio de ambas orillas. *** s/a = Sin aforo.

Tabla 59.- Parámetros hidráulicos requeridos para calibración, AIA Engorda (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Radio hidráulico (m)	Profundidad de escurrimiento (m)	n ₀ (s/m ^{1/3})
8	0.29	0.48	0.071
7	0.29	0.40	0.071
6	0.29	0.70	0.066
5	0.27	0.50	0.069
4	0.28	0.50	0.069
3	0.27	0.48	0.073
2	0.34	0.75	0.063
1	0.27	0.45	0.068

Dada la leve variación del caudal, para la calibración fue considerado el valor promedio, correspondiente a 0.751 m³/s (43% de probabilidad de excedencia de acuerdo a APR Ingeniería, S/Aa). Al respecto, cabe señalar que la diferencia entre el caudal máximo y el promedio es menor al 5% (para el caso del caudal mínimo, la proporción es similar). Las



condiciones de borde de aguas arriba y abajo correspondieron a altura normal de escurrimiento, con pendientes de 6.5% y 3.0%, respectivamente.

Los resultados de la calibración se presentan en la **Figura 57** y **Figura 58** y en la **Tabla 60**. Se obtuvo que el error mínimo (ver **Ecuación 3** y **Figura 57**) se presentó para un incremento del coeficiente de Manning (Δ n) igual a 0.0325 s/m^{1/3}. El coeficiente de Manning en la AIA varió entre 0.092 y 0.101 s/m^{1/3} (ver **Tabla 60**). El error medio obtenido para Δ n correspondió a 3.9 cm. Considerando que el valor medio de la altura máxima de escurrimiento de las 8 secciones medidas en la AIA fue de 0.53 m, en términos medios el error fue de un 7%.

Tabla 60.- Resultados de calibración AIA Engorda ($\Delta n = 0.0325 \text{ s/m}^{1/3}$) (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	Profundidad de escurrimiento medida (m)	Profundidad de escurrimiento simulada (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)	n ₀ + Δn (s/m ^{1/3})
8	0.48	0.43	0.05	10%	0.099
7	0.40	0.37	0.03	8%	0.098
6	0.70	0.75	0.05	7%	0.095
5	0.50	0.51	0.01	2%	0.101
4	0.50	0.51	0.01	2%	0.097
3	0.48	0.42	0.06	13%	0.101
2	0.75	0.74	0.01	1%	0.092
1	0.45	0.50	0.05	11%	0.097

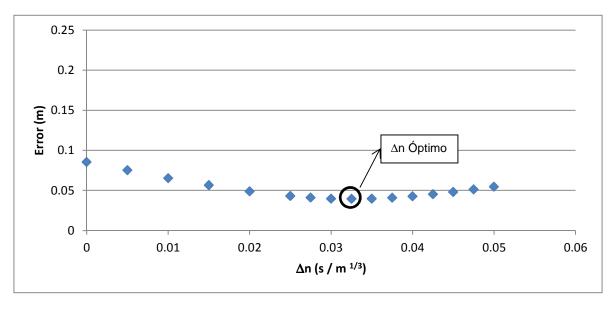


Figura 57.- Determinación de ∆n en AIA Engorda (Fuente: Elaboración propia).

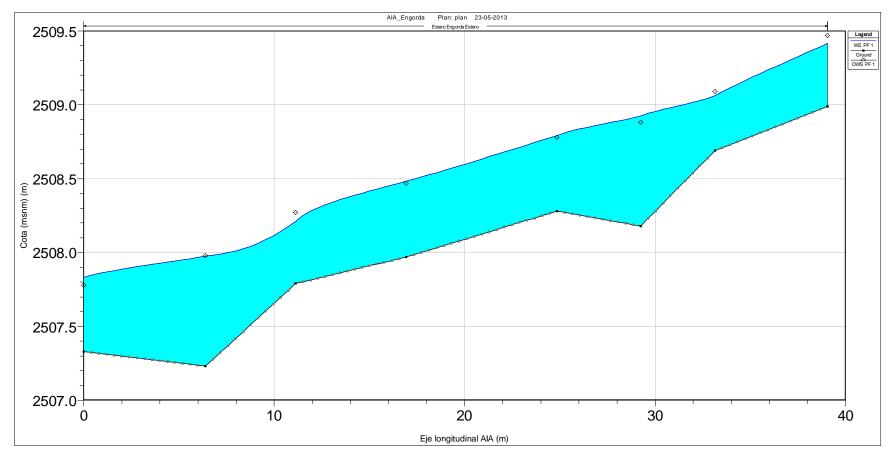


Figura 58.- Eje hidráulico modelado en AIA Engorda. Marcas circulares indican cota topográfica medida del pelo de agua (valor promedio entre pelos de agua medido en ambas riberas). Perfil 8 corresponde a perfil de aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



4.4 Modelación hidráulica. Relación Q _{v/s} n y Q _{v/s} h.

4.4.1 AIA Lajas

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de 1.7 m 3 /s y un máximo de 194.1 m 3 /s (correspondiente a Q_{15} medio diario). Dentro de este rango quedaron ubicados el caudal mínimo diario (22.52 m 3 /s), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) (5.6 m 3 /s) y el Q_{50} (84.9 m 3 /s), entre otros. Se distribuyeron caudales cada 1.733 m 3 /s entre 1.7 m 3 /s y 84.9 m 3 /s y cada 13.652 m 3 /s entre este último y 194.1 m 3 /s. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender la ribera izquierda del perfil 1, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para diversos caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones.

La relación Q v/s n (donde n corresponde al coeficiente de Manning) y Q v/s h para cada uno de los perfiles se presenta en la **Figura 59** y **Figura 60**.

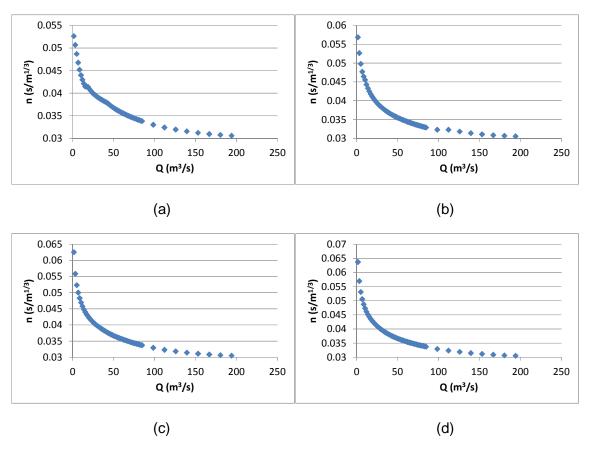


Figura 59.- Relación Q v/s n para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Lajas. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1. (Fuente: Elaboración propia).

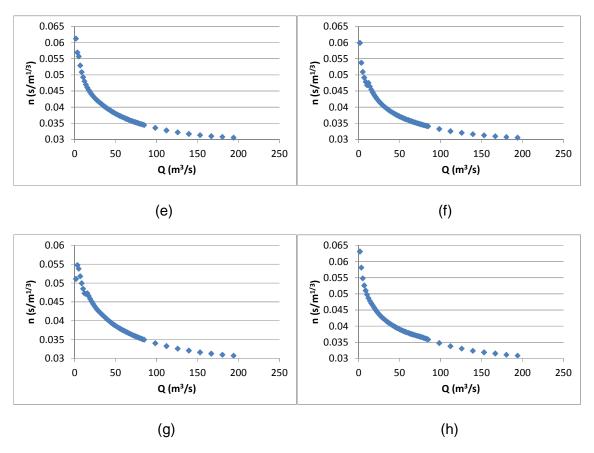


Figura 59 (continuación).- Relación Q v/s n para perfiles topobatimétricos en Maipo en AIA Lajas. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1. (Fuente: Elaboración propia).

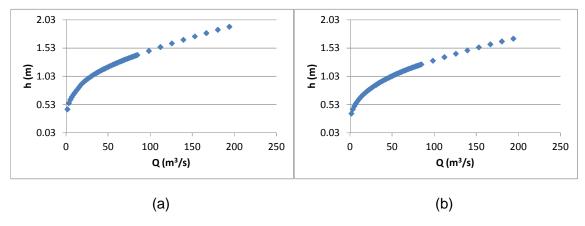


Figura 60.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Lajas. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1. (Fuente: Elaboración propia).

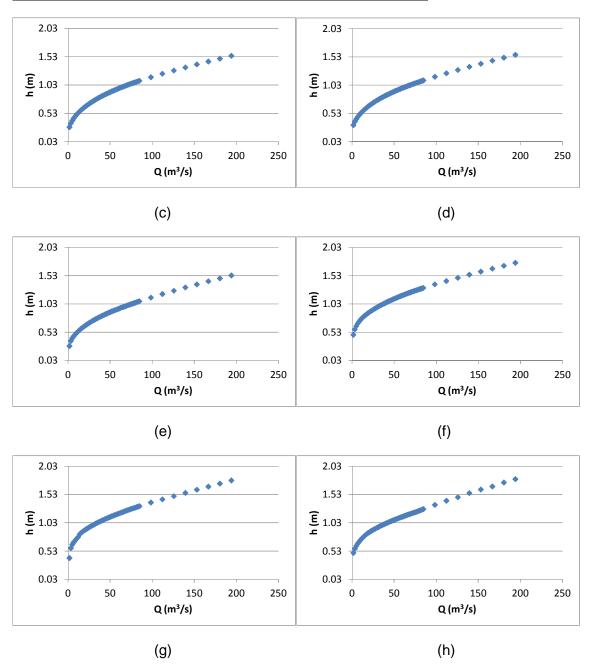


Figura 60 (continuación).- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Lajas. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados de la modelación mostraron una relación potencial decreciente entre el caudal y el coeficiente de Manning, tendiendo a valores cercanos a 0.03 s/m^{1/3} para caudales altos y superando los 0.05 s/m^{1/3} para los caudales mínimos modelados, lo que está dentro de lo esperado, considerando que el aumento del caudal genera un incremento de la relación Rh/ds y, por lo tanto, una reducción del efecto de macrorugosidad del cauce.



4.4.2 AIA Toyo

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de 1.633 m³/s y un máximo de 161.055 m³/s (valor medio entre el Q_{15} medio diario de las AIA San Alfonso y Lajas). Dentro de este rango quedaron ubicados el caudal mínimo diario (superior a 12.1 m³/s), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) (5.1 m³/s) y el Q_{50} (80 m³/s), entre otros. Se distribuyeron caudales cada 1.633 m³/s entre 1.633 m³/s y 80 m³/s y cada 10.132 m³/s entre este último y 161.055 m³/s. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I.**

Para la modelación, fue necesario extender la ribera izquierda del perfil E1, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para diversos caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones.

La relación Q v/s n (donde n corresponde al coeficiente de Manning) y Q v/s h para cada uno de los perfiles se presenta en la **Figura 61** y **Figura 62**.

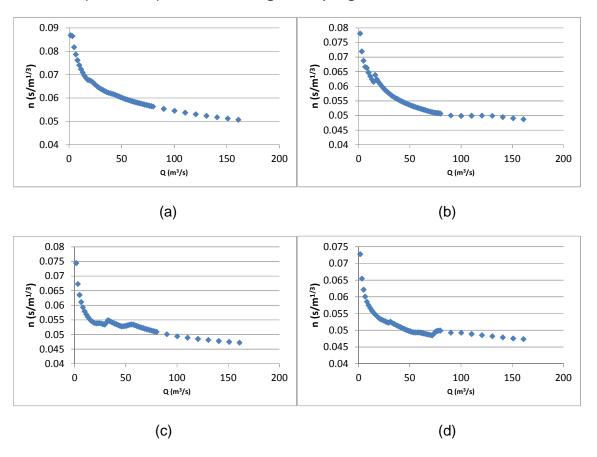


Figura 61.- Relación Q v/s n para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Toyo. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1; (i) E2; (j) E1. (Fuente: Elaboración propia).

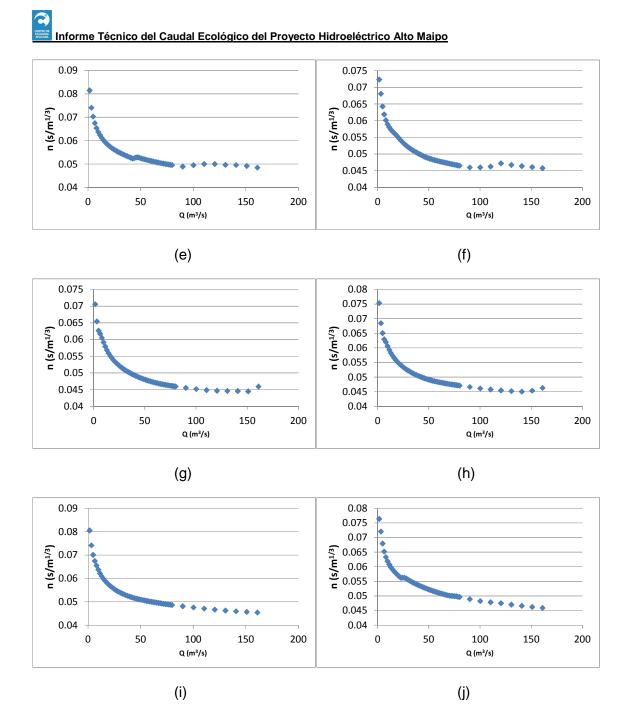


Figura 61 (continuación).- Relación Q v/s n para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Toyo. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1; (i) E2; (j) E1. (Fuente: Elaboración propia).

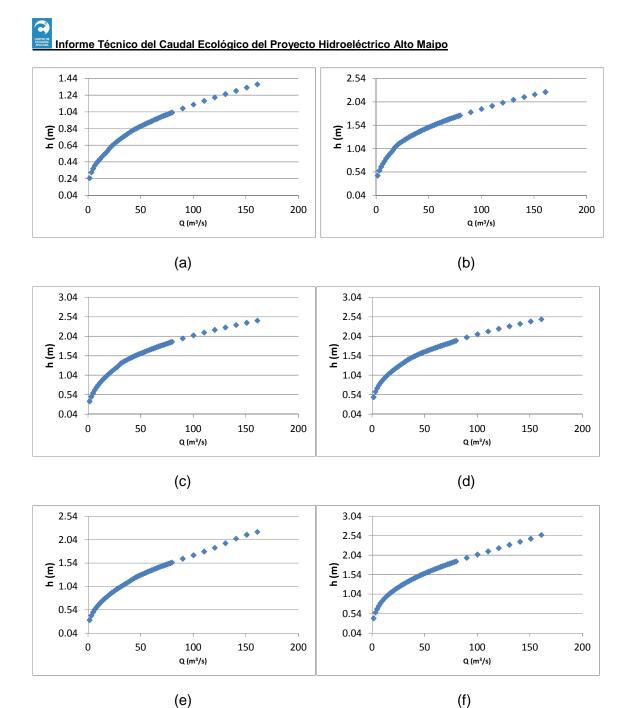


Figura 62.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Toyo. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1; (i) E2; (j) E1. (Fuente: Elaboración propia).

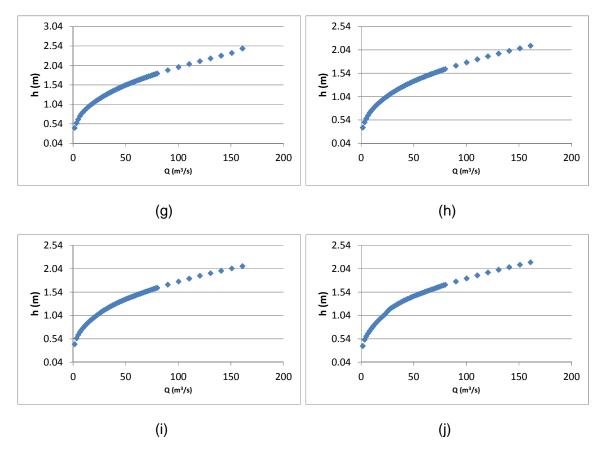


Figura 62 (continuación).- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA Toyo. (a) P8; (b) P7; (c) P6; (d) P5; (e) P4; (f) P3; (g) P2; (h) P1; (i) E2; (j) E1. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados de la modelación mostraron una relación potencial decreciente entre el caudal y el coeficiente de Manning, tendiendo a valores cercanos a 0.045 s/m^{1/3} para caudales altos y superando los 0.08 s/m^{1/3} para los caudales mínimos modelados, lo que está dentro de lo esperado, considerando que el aumento del caudal genera un incremento de la relación Rh/ds y, por lo tanto, una reducción del efecto de macrorugosidad del cauce.

4.4.3 AIA San Alfonso

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de 1.1 m³/s y un máximo de 128 m³/s (Q_{15} medio diario). Dentro de este rango quedaron ubicados el caudal mínimo diario (12.1 m³/s), el caudal ecológico requerido por la fauna íctica y para rafting determinado en CEA (2008) (4.2 m³/s y 16.7 m³/s, respectivamente) y el Q_{50} (53 m³/s), entre otros. Se distribuyeron caudales cada 1.1 m³/s entre 1.1 m³/s y 53.0 m³/s y cada 12.4 m³/s entre este último y 128 m³/s. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Se verificó que la distribución del caudal a través del canal principal y el canal secundario en el perfil 4 no afecta los resultados hacia aguas arriba, en los perfiles considerados para el análisis eco-hidráulico, esto es, perfiles 6 a 8. Se evaluó para 4 caudales diferentes, entre 4 y 60 m^3 /s, dos escenarios. En el primero se estimó que todo el caudal escurre por el canal principal, mientras que en el segundo se estimó que la proporción entre lo que escurre por el brazo derecho de la sección transversal y el caudal total del río Maipo fue la misma que la que se midió durante la campaña de aforo, esto es 9.83/56.9 (ver **Tabla 34**). Los resultados mostraron que para ambos casos solamente hubo diferencias hasta unos 20 m hacia aguas arriba, por lo que el efecto no se propagó hacia el perfil 6, ubicado unos 80 m aguas arriba. De este modo, la distribución del caudal en el sector del perfil 4 no afecta los resultados de la modelación en los perfiles 6 a 8 En la **Figura 63** se muestra el caso para $Q = 26 \text{ m}^3/s$.

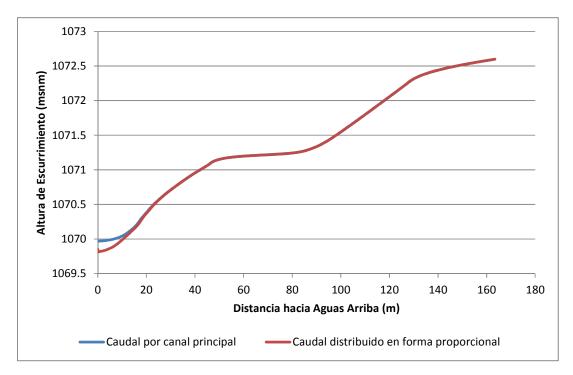


Figura 63.- Variación del eje hidráulico para diferentes formas de distribución del flujo en perfil 4. Se observa que no hay influencia de la distribución elegida en la altura de escurrimiento por sobre los 20 m hacia aguas arriba (Fuente: Elaboración propia).



La relación Q v/s n (donde n corresponde al coeficiente de Manning) y Q v/s h para cada uno de los perfiles se presenta en la **Figura 64** y **Figura 65**.

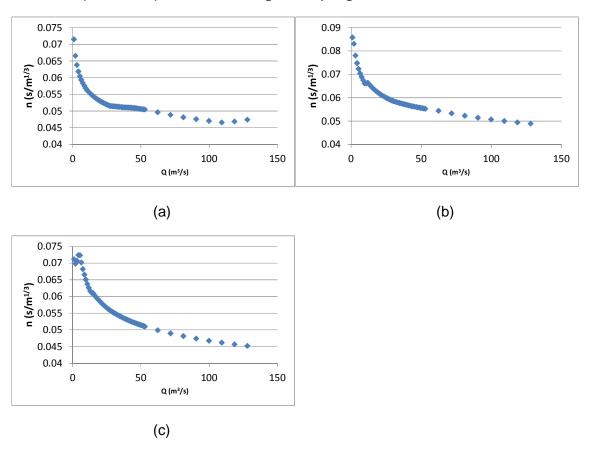


Figura 64.- Relación Q v/s n para perfiles topobatimétricos en río Maipo en AIA San Alfonso. (a) P8; (b) P7; (c) P6. (Fuente: Elaboración propia).

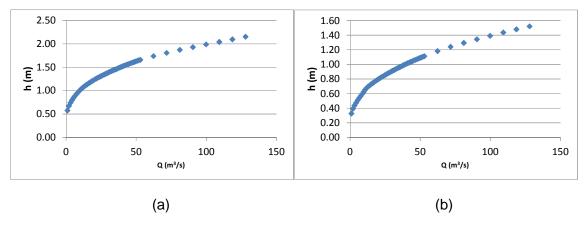


Figura 65.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles topobatimétricos en río Maipo en sector San Alfonso. (a) P8; (b) P7; (c) P6. (Fuente: Elaboración propia).



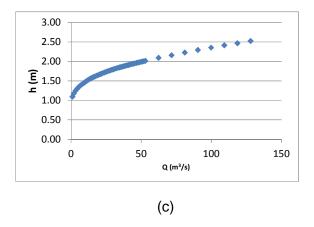


Figura 65 (continuación).- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles topobatimétricos en río Maipo en sector San Alfonso. (a) P8; (b) P7; (c) P6. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como en los casos anteriores, los resultados de la modelación mostraron una relación potencial decreciente entre el caudal y el coeficiente de Manning. Se obtuvieron coeficientes de Manning entre 0.045 s/m^{1/3}, hasta valores superiores a 0.08 s/m^{1/3} en el perfil 2.

Cabe destacar que caudales mayores a los modelados se debieran obtener coeficientes de Manning menores a los mínimos presentados en la **Figura 64**, dado que la relación Rh/ds para Q = 128 m³/s (el máximo modelado) fue menor a 10 en los tres perfiles modelados, valor que corresponde al límite por sobre el cual deja de existir el efecto de la macrorugosidad (Niño, 2005).



4.4.4 AIA Alfalfal

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.409~\text{m}^3/\text{s}$ y un máximo de 70 m³/s (máximo Q₁₅ medio mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el caudal mínimo diario en régimen natural ($2.51~\text{m}^3/\text{s}$), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) y el asignado por DGA ($0.66~\text{m}^3/\text{s}$ y $2.51~\text{m}^3/\text{s}$, respectivamente) y el caudal medio anual ($20~\text{m}^3/\text{s}$), entre otros. Se distribuyeron caudales cada $0.408~\text{m}^3/\text{s}$ entre $0.409~\text{m}^3/\text{s}$ y $20~\text{m}^3/\text{s}$ y cada $6.25~\text{m}^3/\text{s}$ entre este último y $70~\text{m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

A modo de ejemplo de los resultados para cada perfil, la relación Q v/s n (donde n corresponde al coeficiente de Manning) y Q v/s h para el perfil 5 es presentada en la **Figura 66** y **Figura 67**. En el Anexo IV.2 se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

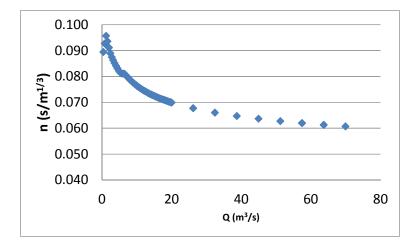


Figura 66.- Relación Q v/s n para perfil 5 en AIA Alfalfal. (Fuente: Elaboración propia).

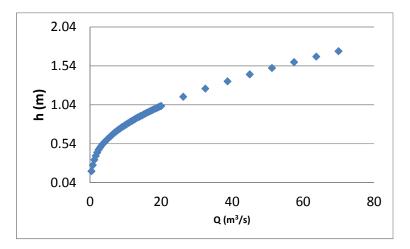


Figura 67.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfil 5 en AIA Alfalfal. (Fuente: Elaboración propia).



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en las AIA del río Maipo), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.1 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.06 s/m^{1/3}. Respecto a los resultados obtenidos para esta relación, caben destacar dos situaciones: En primer lugar, para caudales mayores, se debiera tender a valores menores de "n", dado que la relación Rh/ds fue menor a 10 para el máximo caudal modelado. Por otra parte, para caudales pequeños, se observa una relación creciente entre el coeficiente de Manning y el caudal (ver **Figura 66**). Esto se debe a que con el descenso de la altura de escurrimiento por debajo de un límite dado, también se verifica un descenso del tamaño del sedimento que genera resistencia al flujo, ya que una porción de este queda por sobre el pelo de agua (se estima una relación Rh/ds = 1, ver **Metodología**). Dado que "n" depende del tamaño del sedimento, una vez que este disminuye, manteniéndose la relación Rh/ds constante, el coeficiente de Manning también disminuye (ver **ecuaciones 1 y 2**)



4.4.5 AIA Maitenes

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.613 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo de $93.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (máximo Q_{15} medio mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q_7 mínimo ($4.6 \text{ m}^3/\text{s}$), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) ($2.05 \text{ m}^3/\text{s}$) y el caudal medio anual ($30 \text{ m}^3/\text{s}$), entre otros. Se distribuyeron caudales cada $0.612 \text{ m}^3/\text{s}$ entre $0.613 \text{ m}^3/\text{s}$ y $30 \text{ m}^3/\text{s}$ y cada $7.89 \text{ m}^3/\text{s}$ entre este último y $93.1 \text{ m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender la ribera izquierda de los perfiles 5, 6 y 7, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para diversos caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n (donde n corresponde al coeficiente de Manning) y Q v/s h para los perfiles 8 y 3 es presentada en la **Figura 68** y **Figura 69**. En el Anexo IV.2 se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

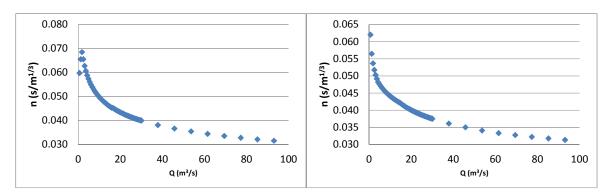


Figura 68.- Relación Q v/s n para perfiles 3 (izq.) y 8 (der.) en AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).

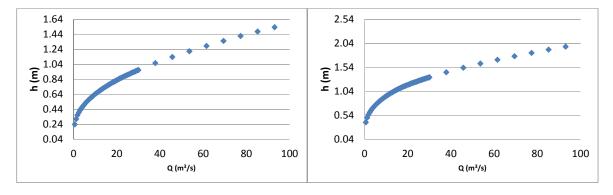


Figura 69.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles 3 (izq.) y 8 (der.) en AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en las AIA del río Maipo), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.07 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.03 s/m^{1/3}. Respecto a los resultados obtenidos para esta relación, tal como para el AIA Alfalfal, se observó que para caudales mayores, se debiera tender a valores menores de "n", dado que la relación Rh/ds fue menor a 10 para el máximo caudal modelado. En cuanto a los caudales menores, en la **Figura 68** se muestran los resultados para un perfil (8) en el que la relación Q v/s n es decreciente en todo el rango evaluado y en otro (3) en el que para caudales pequeños, "n" es creciente con Q. Las diferencias se deben a que en el perfil 8 las alturas de escurrimiento modeladas para caudales bajos fueron lo suficientemente altas como para que fueran superiores al tamaño del sedimento grueso, a diferencia de lo sucedido en el perfil 3. En este último hay un descenso del coeficiente de Manning para caudales pequeños por los motivos explicados en el punto anterior (**Acápite 4.4.4**).



4.4.6 AIA Yeso

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.205~\text{m}^3/\text{s}$ y un máximo de $32.8~\text{m}^3/\text{s}$ (máximo Q_{15} medio mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q_7 mínimo ($1.0~\text{m}^3/\text{s}$), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) y en DGA ($0.46~\text{m}^3/\text{s}$ y $0.82~\text{m}^3/\text{s}$, respectivamente) y el caudal medio anual ($10~\text{m}^3/\text{s}$), entre otros. Cabe destacar que el caudal mínimo histórico corresponde a $0~\text{m}^3/\text{s}$, condición alcanzada por efecto de la operación del embalse el Yeso. Se distribuyeron caudales cada $0.204~\text{m}^3/\text{s}$ entre $0.205~\text{m}^3/\text{s}$ y $32.8~\text{m}^3/\text{s}$ y cada $2.85~\text{m}^3/\text{s}$ entre este último y $32.8~\text{m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender la ribera derecha del perfil 3, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para diversos caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones. Por otra parte, se concentró el flujo en el cauce principal, mientras no fuesen superadas sus cotas máximas, tal como se ejemplifica en la **Figura 70**, que muestra una modelación para el caudal máximo (32.8 m³/s) en el perfil 8.

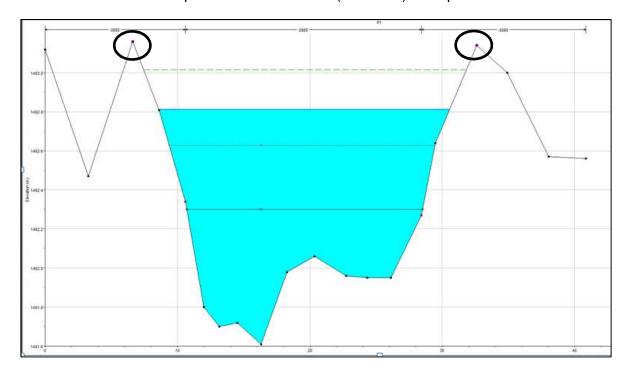


Figura 70.- Pelo de agua en perfil 8 para caudal máximo modelado (Q = 32.8 m³/s). No hay desborde de aguas desde el canal principal mientras no sean superadas sus cotas máximas (indicadas con círculos en figura). (Fuente: Elaboración propia).

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n y Q v/s h para el perfil 8 es presentada en la **Figura 71** y **Figura 72**. En el **Anexo IV.2** se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.



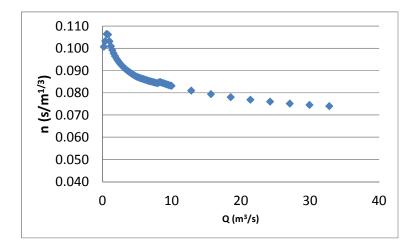


Figura 71.- Relación Q v/s n para el perfil 8 en AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).

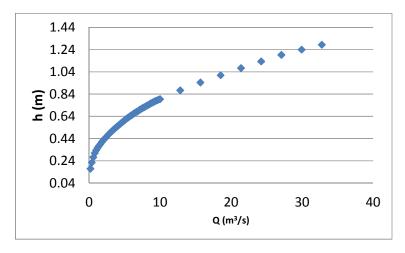


Figura 72.- Curva de descarga (Q v/s h) para el perfil 8 en AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en las AIA de los ríos Maipo y Colorado), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.11 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.07 s/m^{1/3}. Respecto a los resultados obtenidos para esta relación, tal como para las AIA anteriores, se observó que para caudales mayores se debiera tender a valores menores de "n", dado que la relación Rh/ds fue menor a 10 para el máximo caudal modelado. En cuanto a los caudales menores, la situación verificada también corresponde a una analizada para las AIA anteriores, en la que para caudales pequeños, "n" es creciente con Q, por efecto del descenso de la altura de escurrimiento a niveles por debajo del tamaño característico del sedimento grueso.



4.4.7 AIA Volcán

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.185 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo de $35.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (máximo Q_{15} medio mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q_7 mínimo ($0.6 \text{ m}^3/\text{s}$), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) ($0.42 \text{ m}^3/\text{s}$) y el caudal medio anual ($9 \text{ m}^3/\text{s}$), entre otros. Se distribuyeron caudales cada $0.184 \text{ m}^3/\text{s}$ entre $0.185 \text{ m}^3/\text{s}$ y $9 \text{ m}^3/\text{s}$ y cada $3.325 \text{ m}^3/\text{s}$ entre este último y $35.6 \text{ m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender la ribera derecha de los perfiles 1, 3 y 4, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para los mayores caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n y Q v/s h para el perfil 1 es presentada en la **Figura 73** y **Figura 74**. En el **Anexo IV.2** se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

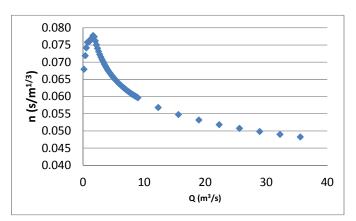


Figura 73.- Relación Q v/s n para el perfil 1 en AIA Volcán. (Fuente: Elaboración propia).

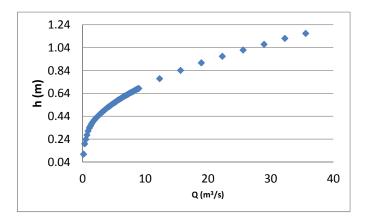


Figura 74.- Curva de descarga (Q v/s h) para el perfil 1 en AlA Volcán. (Fuente: Elaboración propia).



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en los análisis previos), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.08 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.045 s/m^{1/3}. Respecto a los resultados obtenidos para esta relación, tal como para las AIA anteriores, se observó que para caudales mayores, se debiera tender a valores menores de "n", dado que la relación Rh/ds fue menor a 10 para el máximo caudal modelado. En cuanto a los caudales menores, la situación verificada también corresponde a una analizada para las AIA anteriores, en la que para caudales pequeños "n" es creciente con Q, por efecto del descenso de la altura de escurrimiento a niveles por debajo del tamaño característico del sedimento grueso.



4.4.8 AIA Colina

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de 0.066 m³/s y un máximo de 11.2 m³/s (máximo Q₁₅ medio mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q mínimo histórico (0.46 m³/s), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) y asignado por DGA (0.37 m³/s) y el caudal medio anual (3.2 m³/s), entre otros. Se distribuyeron caudales cada 0.65 m³/s entre 0.066 m³/s y 3.2 m³/s y cada 1 m³/s entre este último y 11.2 m³/s. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender ambas riberas del perfil 4a, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para los mayores caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones. Cabe destacar que el perfil 4a no fue calibrado (ver calibración).

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n y Q v/s h para el perfil 1 es presentada en la **Figura 75** y **Figura 87**. En el **Anexo IV.2** se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

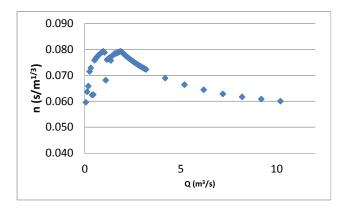


Figura 75.- Relación Q v/s n para el perfil 1 en AIA Colina. (Fuente: Elaboración propia).

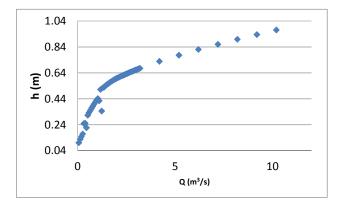


Figura 76.- Curva de descarga (Q v/s h) para el perfil 1 en AIA Colina. (Fuente: Elaboración propia).

Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en los análisis previos), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.08 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.06 s/m^{1/3}. Respecto a los resultados obtenidos para esta relación, tal como para las AIA anteriores, se observó que para caudales mayores, se debiera tender a valores menores de "n", dado que la relación Rh/ds fue menor a 10 para el máximo caudal modelado. En cuanto a los caudales menores, la situación verificada también corresponde a una analizada para las AIA anteriores, en la que para caudales pequeños "n" es creciente con Q, por efecto del descenso de la altura de escurrimiento a niveles por debajo del tamaño característico del sedimento grueso. Al respecto, se es importante recalcar que, a diferencia de los ríos analizados en los puntos anteriores, en este caso la relación creciente entre "n" y Q se da para caudales del orden e incluso superiores al caudal medio anual, debido a la menor altura de escurrimiento del estero Colina.

Por otra parte, en el perfil 1 se verificó inestabilidad en el modelo hidráulico para caudales menores al caudal de calibración, tal como se aprecia en la **Figura 75** y **Figura 87**, por lo que bajo el mismo no fue utilizado en la modelación del hábitat (para más detalle, ver **Acápites** 4.5.8 y 4.6.8). Aunque en forma leve, esta inestabilidad del perfil 1 afectó algunos resultados puntuales de la modelación del perfil 2.



4.4.9 AIA Morado

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.038~\text{m}^3/\text{s}$ y un máximo de $6.6~\text{m}^3/\text{s}$ (máximo $Q_{15}~\text{medio}$ mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q mínimo histórico ($0.25~\text{m}^3/\text{s}$), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) y el asignado por DGA ($0.44^1~\text{y}~0.24~\text{m}^3/\text{s}$, respectivamente) y el caudal medio anual ($1.8~\text{m}^3/\text{s}$), entre otros. Se distribuyeron caudales cada $0.037~\text{m}^3/\text{s}$ entre $0.038~\text{m}^3/\text{s}$ y $1.8~\text{m}^3/\text{s}$ y cada $0.6~\text{m}^3/\text{s}$ entre este último y $6.6~\text{m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n y Q v/s h para los perfiles 1 y 3 es presentada en la **Figura 77** y **Figura 78**. En el **Anexo IV.2** se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

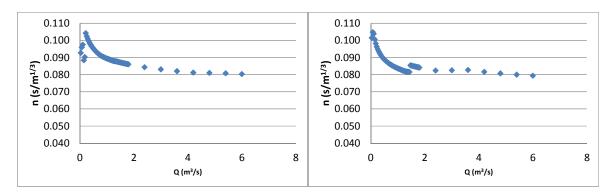


Figura 77.- Relación Q v/s n para perfiles 1 (izquierda) y 3 (derecha) en AIA Morado. (Fuente: Elaboración propia).

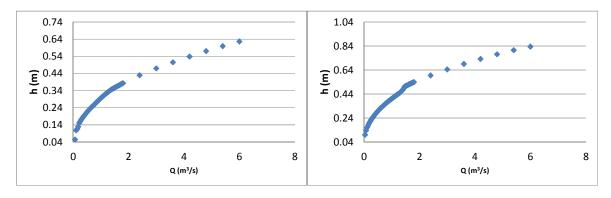


Figura 78.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles 1 (izquierda) y 3 (derecha) en AIA Morado. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en los análisis previos), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.105 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.075 s/m^{1/3}. Respecto a los resultados obtenidos para esta relación, tal como para las AIA

¹ El caudal definido en la RCA fue de 0.17 m³/s, no correspondiendo al determinado por CEA (2008)

Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

anteriores, se observó que para caudales mayores se debiera tender a valores menores de "n", dado que la relación Rh/ds fue menor a 10 para el máximo caudal modelado. En cuanto a los caudales menores, la situación verificada también corresponde a una analizada para las AIA anteriores, en la que para caudales pequeños "n" es creciente con Q, por efecto del descenso de la altura de escurrimiento a niveles por debajo del tamaño característico del sedimento grueso.

Respecto a los resultados presentados, en el perfil 1 se verificó inestabilidad en el modelo hidráulico para caudales menores a 0.22 m³/s, tal como se aprecia en la **Figura 77**. Por otra parte, en el perfil 3 se observaron discontinuidades menores en la relación Q v/s n (ver **Figura 77**), por efecto del cambio de la sección transversal con el aumento del caudal, al llenarse un cauce secundario. Tal efecto se trasladó hacia aguas arriba, alterando levemente la relación Q v/s n de los perfiles 4 y 5 (ver Anexo IV.2).



4.4.10 AIA Placas

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.011~\text{m}^3/\text{s}$ y un máximo de $1.6~\text{m}^3/\text{s}$ (máximo $Q_{15}~\text{medio}$ mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q mínimo histórico ($0.66~\text{m}^3/\text{s}$, aunque es necesario destacar que el caudal de calibración fue inferior a este), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) y el asignado por DGA ($0.10~\text{y}~0.14~\text{m}^3/\text{s}$, respectivamente) y el caudal medio anual ($0.5~\text{m}^3/\text{s}$), entre otros. Se distribuyeron caudales cada $0.010~\text{m}^3/\text{s}$ entre $0.011~\text{m}^3/\text{s}$ y $0.5~\text{m}^3/\text{s}$ y cada $0.138~\text{m}^3/\text{s}$ entre este último y $1.6~\text{m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender la ribera izquierda en todos los perfiles desde el perfil 5 hacia aguas abajo, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para los mayores caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y** II se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones. Por otra parte, se concentró el flujo en el cauce principal, mientras no fuesen superadas sus cotas máximas, para evitar que el modelo inundara en forma artificial la llanura de inundación. Esto fue necesario realizarlo para todos los perfiles, con la excepción del perfil 7. A modo de ejemplo, en la **Figura 80** se presenta la sección transversal del perfil 3.

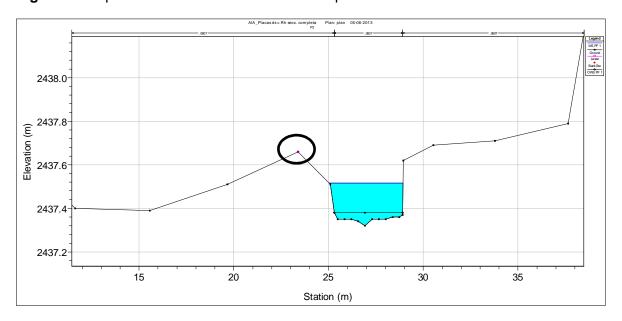


Figura 79.- Perfil 3 en AIA Placas. No hay desborde de aguas desde el canal principal, mientras no sean superadas sus cotas máximas (indicadas con círculos en figura). (Fuente: Elaboración propia).

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n y Q v/s h para los perfiles 2 y 8 es presentada en la **Figura 80** y **Figura 81**. En el **Anexo IV.2** se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

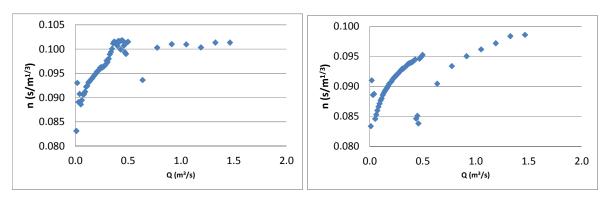


Figura 80.- Relación Q v/s n para perfiles 2 (izquierda) y 8 (derecha) en AIA Placas. (Fuente: Elaboración propia).

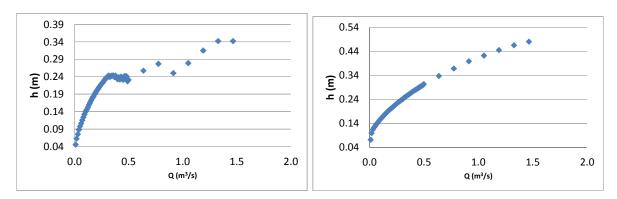


Figura 81.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles 2 (izquierda) y 8 (derecha) en AIA Placas. (Fuente: Elaboración propia).

A diferencia del resto de los tramos evaluados, en el AIA Placas no se verificó la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning. Esto sería debido a la conjunción de dos factores: Por un lado, las bajas alturas de escurrimiento, menores en una alta variabilidad de caudales al tamaño del sedimentos grueso y por otro, a la variabilidad de las secciones transversales con el caudal, en las que a partir de ciertos flujos se llenan sus llanuras de inundación o cauces secundarios, generando cambios en el radio hidráulico y por ende en la relación Rh/ds.

Por otra parte, la interacción entre el bajo rango de caudales modelados, el tamaño del cauce y la morfología del mismo, generó inestabilidades en la modelación, concentradas en los perfiles 2 y 3. Esto se puede apreciar en la **Figura 80** y **Figura 81**, en la que se observa como una nube de puntos se agrupa en torno a los caudales $0.3 - 0.5 \, \text{m}^3/\text{s}$, tanto en la determinación del coeficiente de Manning, como en la altura de escurrimiento. Esta inestabilidad también se extendió a caudales superiores, tal como se puede apreciar en los descensos de nivel con el incremento del caudal, para caudales en torno a los 1 m³/s (**Figura 81**).



4.4.11 AIA Engorda

Se modelaron un total de 57 caudales, distribuidos entre un mínimo de $0.021~\text{m}^3/\text{s}$ y un máximo de $3.8~\text{m}^3/\text{s}$ (máximo Q_{15} medio mensual). Dentro de este rango quedaron ubicados el Q mínimo histórico ($0.145~\text{m}^3/\text{s}$), el caudal ecológico determinado en CEA (2008) y el asignado por DGA ($0.15~\text{y}~0.20~\text{m}^3/\text{s}$, respectivamente) y el caudal medio anual ($1.0~\text{m}^3/\text{s}$), entre otros. Se distribuyeron caudales cada $0.020~\text{m}^3/\text{s}$ entre $0.021~\text{m}^3/\text{s}$ y $1.0~\text{m}^3/\text{s}$ y cada $0.35~\text{m}^3/\text{s}$ entre este último y $3.8~\text{m}^3/\text{s}$. El total de caudales utilizados para la modelación se presenta en el **Anexo IV.I**.

Para la modelación, fue necesario extender la ribera derecha del perfil 5, debido a que su borde superior fue superado por el nivel de agua para los mayores caudales de la simulación. La extensión se hizo estimando que el talud medido por la topobatimetría se mantiene para cotas superiores. En los **Anexos I y II** se presentan los perfiles medidos y sus modificaciones.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en cada perfil, la relación Q v/s n y Q v/s h para los perfiles 1 y 2 es presentada en la **Figura 82** y **Figura 83**. En el **Anexo IV.2** se presentan los resultados gráficos para los perfiles restantes.

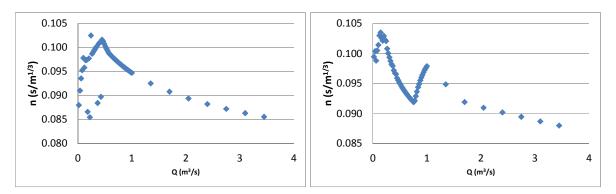


Figura 82.- Relación Q v/s n para perfiles 1 (izquierda) y 2 (derecha) en AIA Engorda. (Fuente: Elaboración propia).

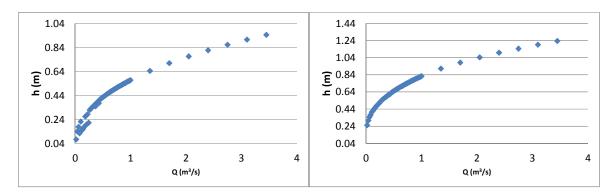


Figura 83.- Curva de descarga (Q v/s h) para perfiles 1 (izquierda) y 2 (derecha) en AIA Engorda. (Fuente: Elaboración propia).

Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Los resultados de la modelación mostraron la relación potencial decreciente esperada entre el caudal y el coeficiente de Manning (relación ya verificada en los análisis previos), variando el valor de "n" entre un máximo cercano a 0.105 s/m^{1/3} y un mínimo de 0.085 s/m^{1/3}. No obstante, se verificó una situación diferente a la de los análisis previos (similar al caso del AIA Placas). Al corresponder ambos cauces a los de menor flujo y a los de menor extensión de la sección transversal (en algunos perfiles el ancho de la sección transversal es menor a 2 metros), a medida que aumentan los caudales de modelación, los cambios en la sección transversal son más significativos, llenándose cauces secundarios o inundándose superficies planas adyacentes al cauce principal. Esto produce cambios importantes en el radio hidráulico de la sección, generando discontinuidades en la relación Q v/s n, tal como se aprecia en este caso para el perfil 2 (**Figura 82**). Por este motivo, para verificar la relación Q v/s n se requiere de mediciones en condiciones de aguas más bajas y también en el caso para aguas altas.

Relacionado también con lo mencionado en el párrafo anterior, la modelación para caudales bajos genera algunas inestabilidades que el Software HEC-RAS no es capaz de resolver. Esto se aprecia para el caso del perfil 1 (**Figura 82** y **Figura 83**), cuyos resultados son irregulares para caudales menores a 0.43 m³/s.



4.5 Modelación hidráulica. Distribución de velocidades.

4.5.1 AIA Lajas

De acuerdo a lo expuesto en la **Tabla 26**, hubo 7 perfiles aforados de un total de 8 perfiles en lo que fue medida la sección transversal, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 7 perfiles.

El escurrimiento se presentó canalizado, presentando todas las secciones condiciones relativamente similares, con valores máximos de velocidad en torno a los 2 m/s en el tramo intermedio, regularmente asociado a la profundidad máxima. A modo de ejemplo, en la **Figura 84** se presenta la distribución de velocidades del perfil 8 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

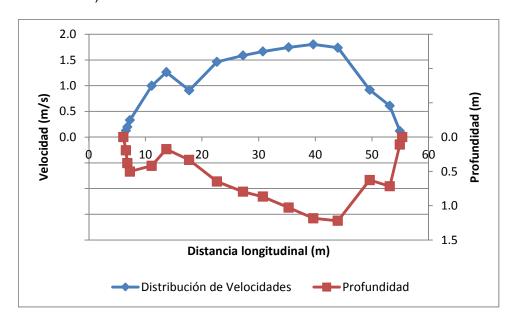


Figura 84.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 8, Maipo en AIA Lajas. (Fuente: Elaboración propia).

En el perfil 1 no fue realizado aforo, por lo que su distribución se determinó por medio del software HEC-RAS, tal como se explica en el **Acápite** 3.3.4. La distribución de la velocidad modelada en dicho perfil se presenta en la **Figura 85**.

La velocidad máxima en el perfil fue levemente inferior a 3.5 m/s. Al respecto, cabe destacar que tanto la superficie de la sección transversal, cómo la profundidad máxima del perfil, fueron menores a los de las restantes secciones, por lo que es esperable obtener una velocidad superior. Por otra parte, en el análisis del factor de ajuste de la velocidad determinado por PHABSIM (VAF), discutido a continuación, se puede observar



que este fue superior a la unidad para el caudal de calibración para todos los perfiles con velocidades medidas, siendo estas aumentadas por el modelo.

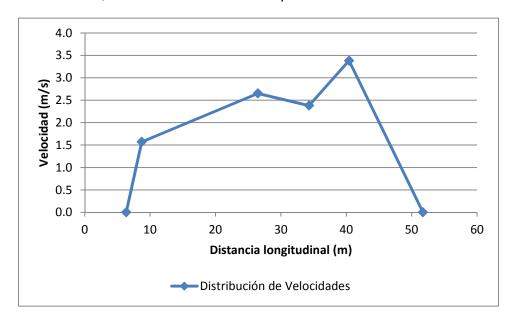


Figura 85.- Distribución de velocidades en Perfil 1, Maipo en AIA Lajas. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico (ver **Acápite** 4.3.1). Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 1.18 y 1.41, y se presentan en la **Tabla 61**.

Tabla 61.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en río Maipo en sector AIA Lajas para caudal de calibración = 72.39 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1*	2	3	4	5	6	7	8
VAF	1.12*	1.41	1.25	1.36	1.18	1.18	1.34	1.32

^{*} Se utilizó distribución obtenida de Software HEC-RAS.

Los valores superiores a la unidad se explicarían por una parte en el uso de los valores calibrados (coeficiente de Manning y altura de escurrimiento), pero principalmente están asociados a las condiciones naturales del río (velocidad de escurrimiento, macrorugosidad, turbulencia, entre otras, que generan irregularidades de la superficie libre), que produjeron diferencias entre los perfiles topobatimétricos y las alturas medidas por el aforador, posiblemente por el oleaje existente en el río. Una muestra de lo anterior queda graficada en la **Figura 86**, en la que se comparan el perfil 8 medido por medio de topobatimetría y del aforo, observándose diferencias del orden de 30-40 cm.



La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 87**.

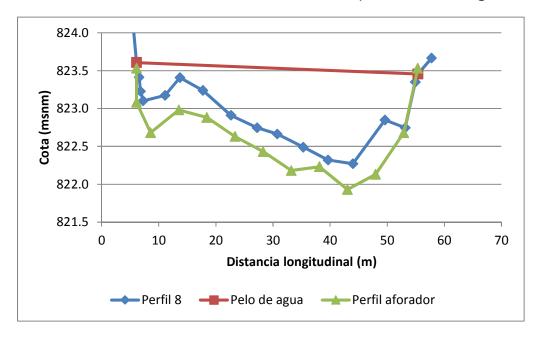


Figura 86.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido por aforador en perfil 8, Maipo en AIA Lajas. (Fuente: Elaboración propia).

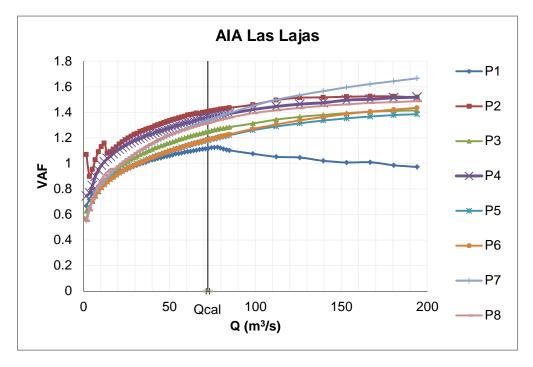


Figura 87.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en Maipo en AIA Lajas. (Fuente: Elaboración propia).

CENTRO DE ECOLOGIA AFLICADA

Los resultados mostraron una relación creciente entre el VAF y el caudal en la mayoría de los casos, por lo que se incrementa para caudales superiores al caudal de calibración (Qcal) y disminuye para caudales menores. Esto es esperable, toda vez que al considerar un coeficiente de Manning invariable con el caudal, obtenido de la distribución de velocidades asociada al caudal de calibración, para caudales menores dicho coeficiente estaría siendo subestimado. A su vez, de acuerdo a la ecuación de Manning esto sobrestimaría la velocidad, si se considera una altura de escurrimiento dada, con lo que el caudal determinado por PHABSIM sería cada vez mayor respecto al caudal ingresado para la modelación, disminuyendo así el VAF. Visto de forma similar, el VAF está dando cuenta de la variabilidad del coeficiente de Manning en función del caudal, ya que para lechos gravosos y flujos turbulentos plenamente desarrollados el coeficiente de Manning experimenta un aumento conforme disminuye el caudal con respecto al de calibración (ver Figura 59), lo cual genera coeficientes subestimados que sobrestimarían el caudal simulado y, por ende el VAF debe ser menor a la unidad. La explicación para el aumento del valor del VAF para caudales mayores es análoga.

La explicación anterior, aunque válida en términos generales, es incompleta, ya que no se considera dentro de las variables la relación entre el caudal y la altura de escurrimiento. Cambios en esta relación, o asociados a cambios en el tipo de escurrimiento, pueden generar cambios en la monotonía de la relación VAF v/s caudal. Un ejemplo de esto corresponde a lo observado para el perfil 1, en el que para caudales crecientes hubo un descenso del VAF a partir de un valor dado, cercano al caudal de calibración. Esto estaría asociado a que el escurrimiento a partir de un cierto caudal corresponde a un escurrimiento crítico, cuya altura de escurrimiento es independiente del coeficiente de Manning. En este caso, el VAF depende de cómo varía la altura de escurrimiento, la cual es crítica para caudales altos, lo que está fuertemente influenciado por la geometría particular de la sección transversal.

4.5.2 AIA Toyo

Debido a las características del río en este tramo, solamente fueron aforados 3 perfiles, de un total de 10 (ver **Tabla 29Tabla 29**), por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento solamente en esos 3 perfiles (perfiles 1, E2 y E1).

Las velocidades máximas medidas estuvieron en torno a 3 m/s en los perfiles E2 y E1, mientras que en el perfil 1 las velocidades alcanzaron cerca de 2.5 m/s. Cabe destacar que a pesar de corresponder a un caudal menor, las condiciones locales morfológicas generaron que las velocidades fuesen superiores a las del sector de las Lajas, lo que a su vez imposibilitó llevar a cabo un mayor número de aforos. A modo de ejemplo, en la **Figura 88** se presenta la distribución de velocidades del perfil 1 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el Anexo I (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).



En los perfiles 8 a 2 y en el perfil no fue realizado aforo, por lo que su distribución se determinó por medio del software HEC-RAS, tal como se explica en el **Acápite** 3.3.4. Las distribuciones modeladas presentaron valores similares a los del perfil 1, alcanzándose magnitudes máximas en torno a los 2.5 m/s. A modo de ejemplo, la distribución de velocidades del perfil 7 se presenta en la **Figura 89**.

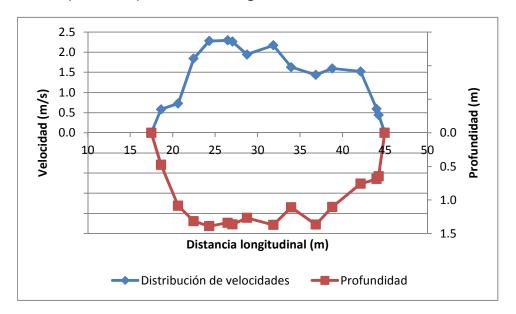


Figura 88.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 1, Maipo en AIA Toyo. (Fuente: Elaboración propia).

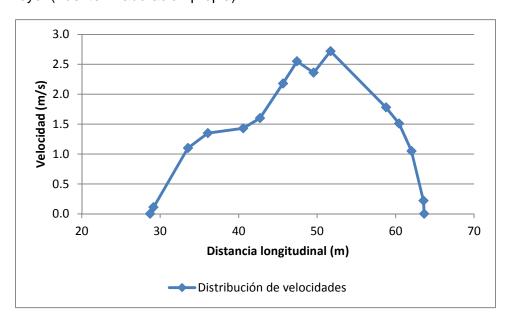


Figura 89.- Distribución de velocidades en Perfil 7, Maipo en AIA Toyo. (Fuente: Elaboración propia).



Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico (ver **Acápite 4.3.2**). Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para los perfiles medidos y los determinados por HEC-RAS de acuerdo a las condiciones de escurrimiento. Cabe destacar que debido a que la medición de los aforos fue desarrollada para diferentes caudales, se consideró un valor intermedio para la calibración, correspondiente a 54.16 m³/s. Esto, debido a que las diferencias entre los caudales fueron bajas (la diferencia entre el caudal promedio y cada uno de los aforos particulares es del orden de un 6%) y a que de esta forma fue posible utilizar el set de datos medidos, considerando una condición media, y disminuir el uso de perfiles de velocidad simulados. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 0.73 y 1.04, y se presentan en la **Tabla 62**.

Tabla 62.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en río Maipo en sector AIA Toyo para caudal de calibración = 72.39 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	E1	E2	1	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*
VAF	0.73	0.73	1.04	1.01*	1.01*	1.03*	1.02*	1.06*	1.02*	1.01*

^{*} Se utilizó distribución obtenida de Software HEC-RAS.

Tal como en el caso de la AIA las Lajas, los valores del VAF alejados de la unidad se explicarían en gran medida por las diferencias entre las mediciones topobatimétricas y los aforos en los perfiles E1 y E2 (en el perfil 1 hubo coincidencias importantes entre la topobatimetría y el aforo, lo que explica el valor cercano a la unidad del VAF). También influenciaría este valor el uso del caudal promediado entre las dos fechas de aforo, aunque la influencia sería menor debido a la similitud de los caudales. En la **Figura 90** se comparan los perfiles E2 y 1 medidos por medio de topobatimetría y del aforo. Mientras en el perfil 1 hay similitudes en ambas mediciones, con diferencias menores a 10 cm, en E2 la sección aforada es considerablemente menor a la medida, con diferencias en la zona central de hasta 40 cm.

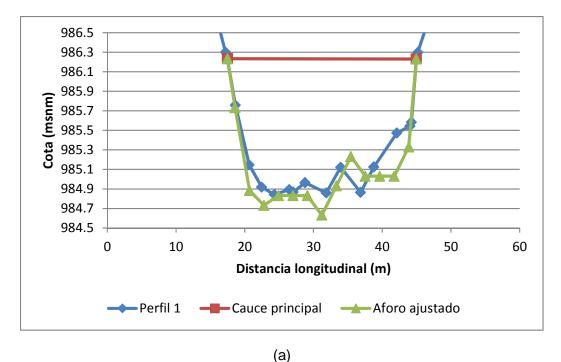
La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 91**.

Tal como para el caso del AIA Lajas, los resultados mostraron una relación creciente entre el VAF y el caudal en la mayoría de los casos, por lo que se incrementa para caudales superiores al caudal de calibración (Qcal) y disminuye para caudales menores, presentando la mayoría de las secciones un VAF cercano a 1 para el caudal de calibración, aunque en la mayoría de estas secciones el perfil de velocidades fue determinado por HEC-RAS.

De la **Figura 91** se desprende nuevamente que, en general, para caudales inferiores al de calibración el coeficiente de Manning aumenta al tornarse el lecho más macro rugoso y, por el contrario, para caudales superiores al de calibración el coeficiente de Manning tiende a ser decreciente, lo cual se explica debido a que el lecho se acerca a la transición



rugosa-macro rugosa. Sin embargo, estas condiciones son generales, debido a que para caudales extremos, tanto superiores como inferiores se pierde la tendencia debido a cambios de escurrimientos locales en determinadas secciones transversales.



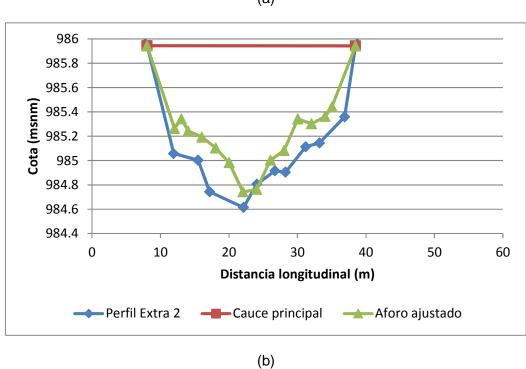


Figura 90.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido en aforo perfiles (a) 1 y (b) E2, Maipo en AIA Toyo. (Fuente: Elaboración propia).

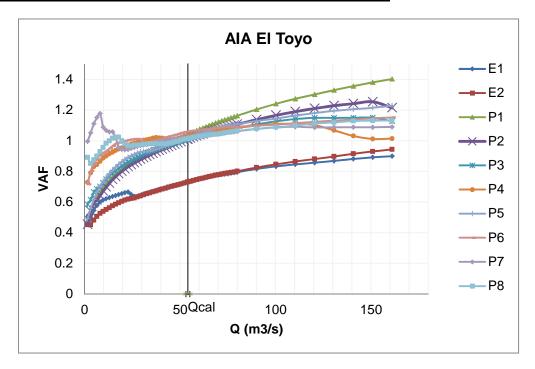


Figura 91.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en Maipo en AIA Toyo. (Fuente: Elaboración propia).

4.5.3 AIA San Alfonso

Tal como en el caso de la AIA Toyo, en el sector de San Alfonso en la minoría de los perfiles hubo aforos asociados. Es más, por efecto de las características del rio en el tramo, solamente se calibró con 3 perfiles, de los cuales se contó con aforos en 2 de ellos, correspondientes a los ubicados aguas arriba (ver **Acápite** 4.3.3).

Las velocidades máximas medidas superaron los 3 m/s en el perfil 8 y estuvieron en torno a los 2.2 m/s en el perfil 7. A modo de ejemplo, en la **Figura 92** se presenta la distribución de velocidades del perfil 8 usada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para el perfil restante se presentan en el Anexo I (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

El perfil 6 no presentó aforo asociado, por lo que su distribución se determinó por medio del software HEC-RAS, tal como se explica en el **Acápite** 3.3.4. Cabe destacar que para obtener un buen resultado para el VAF, se interpolaron más de 30 puntos en los tramos intermedios de la sección, de modo de darle mayor continuidad a la misma y mejorar la distribución de velocidad. La distribución de velocidad obtenida para el perfil 6 se presenta en la **Figura 93**.

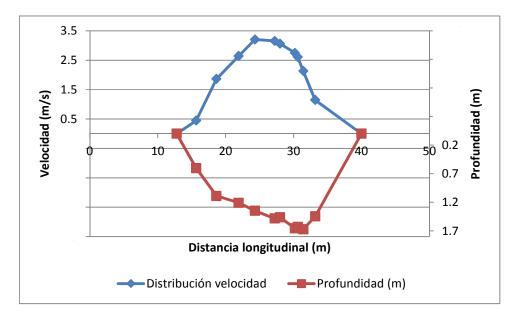


Figura 92.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 8, Maipo en AIA San Alfonso. (Fuente: Elaboración propia).

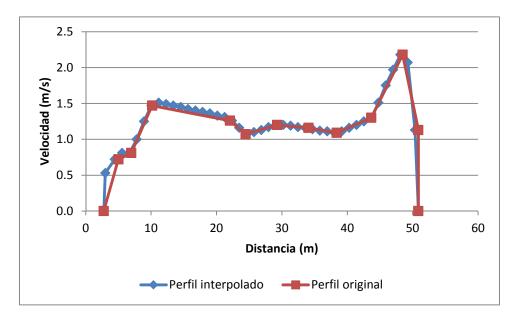


Figura 93.- Distribución de velocidades en Perfil 6, Maipo en el San Alfonso. Se presenta distribución para el caso de perfil transversal original y para perfil transversal interpolado. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico (ver **Acápite 4.3.3**). Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para los perfiles medidos y el modelado. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 0.94 y 1.23, presentándose en la **Tabla 63.**.



Tabla 63.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en río Maipo en AIA San Alfonso para caudal de calibración = 58.7 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	6*	7	8
VAF	0.94*	1.29	0.94

^{*} Se utilizó distribución obtenida de Software HEC-RAS.

Cabe destacar que en el caso de la AIA San Alfonso se contó con el caudal medido en la estación fluviométrica, lo que acotó los posibles errores del aforo debido a las condiciones del río. Esto se manifestó en valores del VAF relativamente cercanos a la unidad.

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 94**.

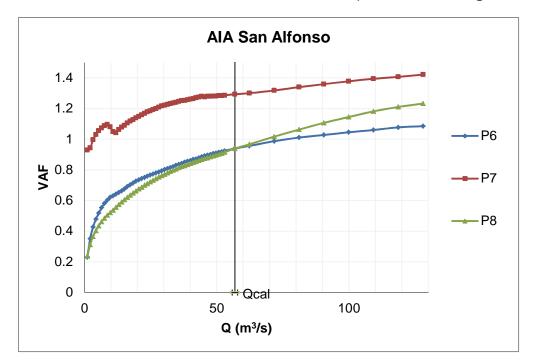


Figura 94.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en Maipo en AIA San Alfonso. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como para el caso del AIA Lajas, los resultados mostraron una relación creciente entre el VAF y el caudal en los diferentes casos analizados, por lo que se incrementa para caudales superiores al caudal de calibración (Qcal) y disminuye para caudales menores, por los motivos y con las excepciones ya mencionadas anteriormente en el **Acápite** 4.5.1.



4.5.4 AIA Alfalfal

De acuerdo a lo expuesto en la **Tabla 36** los 8 perfiles topobatimétricos presentaron aforo simultáneo asociado, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 8 perfiles.

Los aforos mostraron que el flujo se concentró en el borde derecho del cauce en los perfiles ubicados aguas arriba, tendiendo hacia el centro del cauce y el borde izquierdo desde el perfil 5, hacia aguas abajo. Las velocidades máximas medidas estuvieron en torno a 1.6 m/s (perfiles 1, 4 y 5). Los perfiles con velocidades máximas menores fueron los de aguas arriba (7 y 8), con magnitudes cercanas a 1.2 m/s. A modo de ejemplo, en la **Figura 95** se presenta la distribución de velocidades del perfil 6 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

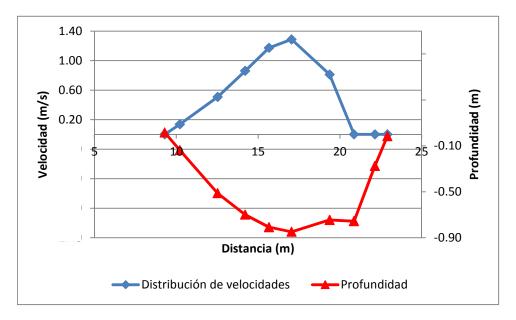


Figura 95.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 8, Colorado en AIA Alfalfal. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 1.18 y 1.41, y se presentan en la **Tabla 64.**



Tabla 64.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en río Colorado en sector AIA Alfalfal para caudal de calibración = 6.251 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8
VAF	1.26	1.18	1.08	1.07	0.89	0.88	1.21	1.01

En comparación con los valores obtenidos en la AIA Lajas del río Maipo, que tuvo 7 perfiles aforados, los VAF estuvieron relativamente cerca de la unidad, lo que se debería a la menor diferencia entre el perfil de aforo y el perfil topobatimétrico. Esto a su vez es consecuencia de las condiciones de menor turbulencia, menor velocidad de escurrimiento del flujo y menor oleaje como consecuencia, entre otras condiciones del flujo. En la **Figura 96** se comparan las secciones transversales medidas por los perfiles topobatimétricos y de aforo, para los perfiles 6 (VAF < 1) y 7 (VAF > 1). En el primer caso se observó una sección de aforo levemente menor a la topobatimétrica, por lo que el caudal quedó sobrestimado en el modelo PHABSIM, mientras que en el perfil 7 se dio el caso inverso, alcanzándose en la sección central diferencias del orden de 10-15 cm entre ambas mediciones.

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 97**.

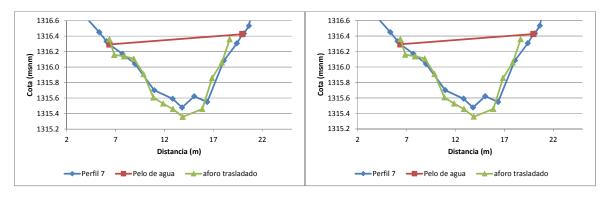


Figura 96.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido por aforador en perfil 7 (izquierda) y 6 (derecha), Colorado en AIA Alfalfal. (Fuente: Elaboración propia).

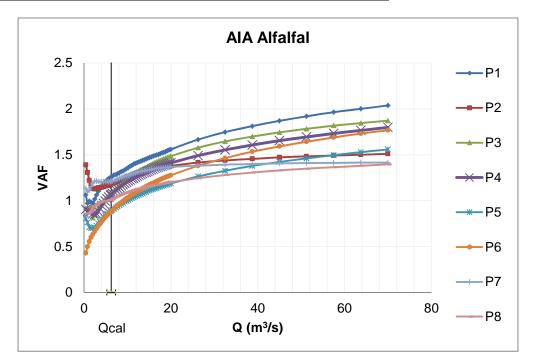


Figura 97.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en Colorado en AIA Alfalfal. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como para las AIA analizadas en los puntos anteriores, se observó una tendencia general de aumento del valor del VAF con el caudal, salvo para los caudales más pequeños, en los que, en algunos casos particulares, hubo tendencias decrecientes o irregulares en la relación entre ambos parámetros.

4.5.5 AIA Maitenes

Debido a las características del río en este tramo, solamente fue aforado 1 perfil, de un total de 8 (ver **Tabla 39**), por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento solamente en aquél (perfil 2).

La velocidad máxima medida fue cercana a 3 m/s. Cabe destacar que a pesar de corresponder a un caudal menor, las condiciones locales morfológicas generaron que las velocidades fuesen superiores a las de algunos tramos del río Maipo, lo que a su vez imposibilitó llevar a cabo un mayor número de aforos. A modo de ejemplo, en la **Figura 98** se presenta la distribución de velocidades del perfil 2 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles sin aforo se presentan en el **Anexo IV.4.**

En los perfiles 8 a 3 y en el perfil 1no fueron realizados aforos, por lo que su distribución se determinó por medio del software HEC-RAS, tal como se explica en el **Acápite** 3.3.4. Las distribuciones modeladas presentaron valores inferiores a los del perfil 2, alcanzándose magnitudes máximas en torno a los 1.8 – 2.0 m/s. A modo de ejemplo, la distribución de velocidades del perfil 6 se presenta en la **Figura 99**.



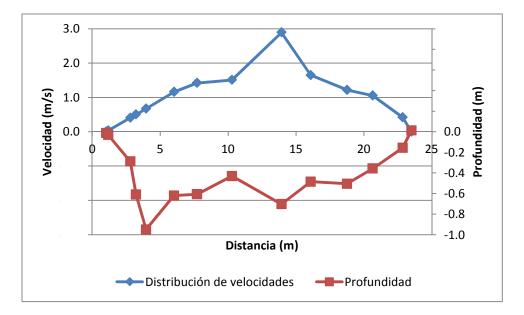


Figura 98.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 2, Colorado en AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).

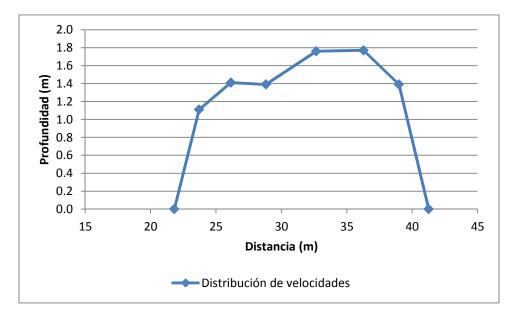


Figura 99.- Distribución de velocidades en Perfil 6, Colorado en AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para los perfiles medidos y los determinados por HEC-RAS de acuerdo a las condiciones de escurrimiento. Cabe destacar que debido a que la medición de los perfiles topobatimétricos fue desarrollada para diferentes caudales, se consideró un valor



intermedio para la calibración, correspondiente a 18.52 m³/s. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 1.01 y 1.15, y se presentan en la **Tabla 65**.

Tabla 65.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en río Colorado en sector AIA Maitenes para caudal de calibración = 18.52 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1*	2	3*	4*	5*	6*	7*	8*
VAF	1.02*	1.15	1.01*	1.01*	1.02*	1.01*	1.04*	1.02*

^{*} Se utilizó distribución obtenida de Software HEC-RAS.

Cabe destacar que el mayor valor del VAF correspondió al perfil medido, indicando el resultado que el caudal podría estar levemente sobreestimado, ya que las diferencias serían menores. Tal como en el caso del río Maipo, esto sería factible, dado que por efecto de las irregularidades del flujo, las alturas aforadas podrían estar sobreestimadas. La sobreestimación del caudal también es consistente con posibles aportes intermedios entre la AIA y la estación fluviométrica considerada para la caracterización de los caudales. En la **Figura 100** se presenta una comparación del perfil 2 medido por medio de topobatimetría y del aforo. Se observa una mayor profundidad asociada al aforo en los tramos de mayor velocidad del flujo, con diferencias entre 10 y 20 cm.

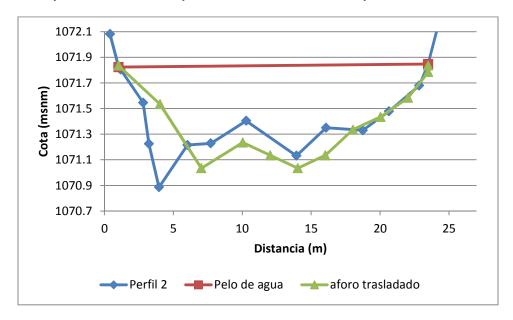


Figura 100.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido en aforo perfil 2, Colorado en AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 101**.

Tal como para los casos anteriores, los resultados mostraron una relación creciente entre el VAF y el caudal en la mayoría de los casos, por lo que se incrementa para caudales superiores al caudal de calibración (Qcal) y disminuye para caudales menores,



presentando la mayoría de las secciones un VAF cercano a 1 para el caudal de calibración, aunque en la mayoría de estas secciones el perfil de velocidades fue determinado por HEC-RAS (resultado similar al obtenido para el AIA Toyo).

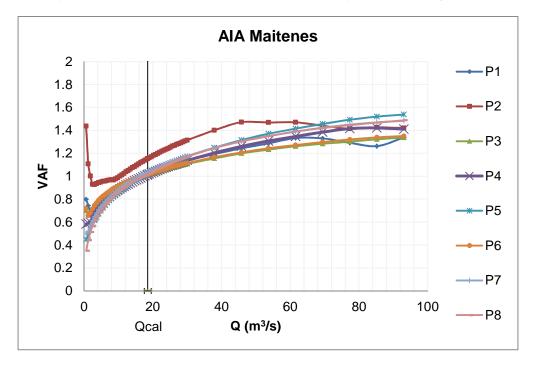


Figura 101.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en Colorado en AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).

4.5.6 AIA Yeso

De acuerdo a lo expuesto en la **Tabla 42**, los 8 perfiles topobatimétricos presentaron aforo simultáneo asociado, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 8 perfiles.

En general, las velocidades máximas se concentraron en el sector central del cauce, alcanzándose magnitudes de la velocidad máxima de hasta 2 m/s (perfiles 2 y 6). Las menores velocidades máximas fueron obtenidas en los perfiles 2 y 5, estando sus magnitudes en torno a 1.4 m/s. A modo de ejemplo, en la **Figura 102** se presenta la distribución de velocidades del perfil 6 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).



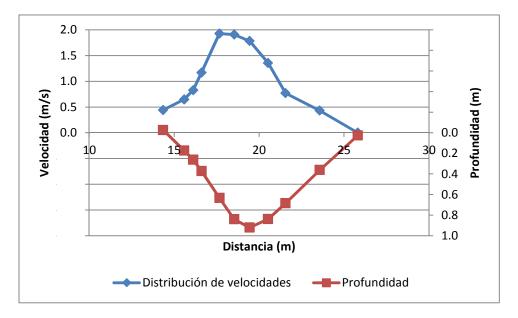


Figura 102.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 8, AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 1.18 y 1.41, y se presentan en la **Tabla 66**.

Tabla 66.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en AIA Yeso para caudal de calibración = 6.94 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8
VAF	1.03	0.84	1.28	0.91	1.20	0.99	1.13	1.02

Los resultados mostraron valores del VAF más cercanos a la unidad, respecto a los obtenidos en el río Maipo, lo que es esperable, considerando el menor caudal y la condición vadeable del río Yeso. Esta misma condición se dio para el río Colorado en el AIA Alfalfal (con caudales similares), lo que se refleja en una relativa similitud entre los resultados. Las mayores diferencias se observaron en el perfil 3 (VAF = 1.28). En la **Figura 103** se comparan las secciones transversales medidas por los perfiles topobatimétricos y de aforo, observándose que pese a presentar un menor ancho de cauce, el perfil del aforo generó una sobreestimación del flujo al considerar mayores alturas de escurrimiento (posiblemente por efecto de la turbulencia del flujo). Esta información es complementada con una fotografía del sector de aforo, presentada en la **Figura 104**, en la que se aprecia la turbulencia del río.



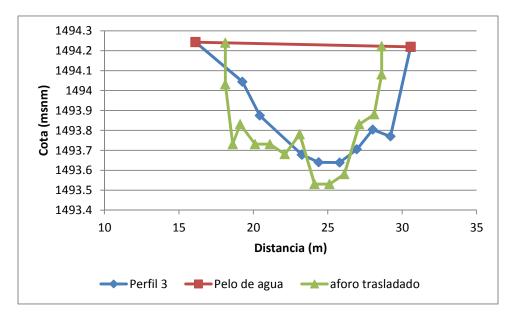


Figura 103.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido por aforador en perfil 3 en AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).



Figura 104.- Imagen perfil 3 en AIA Yeso. (Fuente: Imagen proporcionada por el Mandante).

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 105**.

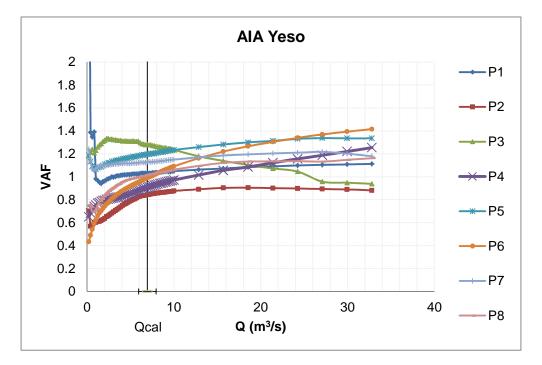


Figura 105.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como para las AIA analizadas en los puntos anteriores, se observó una tendencia general de aumento del valor del VAF con el caudal, salvo para los caudales más pequeños, en los que, en algunos casos particulares, hubo tendencias decrecientes o irregulares en la relación entre ambos parámetros. La excepción a lo anterior correspondió al perfil 3, que presentó una relación decreciente entre el VAF y el flujo. Cabe destacar que esto fue efecto del uso del modelo 1-Vel de PHABSIM, que sobrestimó la velocidad en el borde izquierdo del perfil 3. De acuerdo a las ecuaciones asociadas al uso de este modelo (ecuaciones 4 a 9), esto podría deberse a la falta de mayor resolución de puntos medidos en dicho borde, generándose una celda que tiende a sobreestimar el caudal circulante en torno a la ribera. Esto se aprecia en la Figura 106, donde la velocidad estimada para un caudal dado aumenta en mayor proporción en ese tramo que en el resto de la sección (por sobre puntos con mayor velocidad medida).

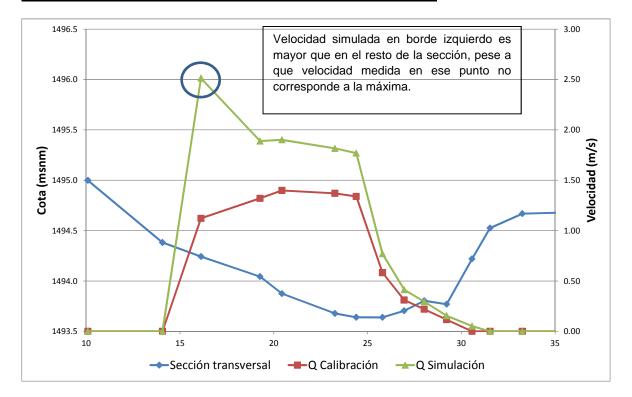


Figura 106.- Perfil transversal de velocidades medida y simulada en perfil 3 en AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).

4.5.7 AIA Volcán

De acuerdo a lo expuesto en la **Tabla 45**, los 8 perfiles topobatimétricos presentaron aforo simultáneo asociado, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 8 perfiles.

En general, las velocidades máximas se concentraron en el sector central del cauce, alcanzándose magnitudes de la velocidad máxima del orden de 1 m/s, con un máximo de 1.13 m/s (perfil 7). A modo de ejemplo, en la **Figura 107** se presenta la distribución de velocidades del perfil 7 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 1.18 y 1.41, y se presentan en la **Tabla 67**.



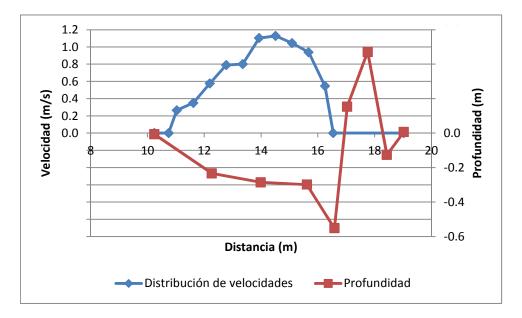


Figura 107.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 8, AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 67.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en AIA Volcán para caudal de calibración = 1.23 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8
VAF	0.99	1.15	0.89	1.19	0.82	0.88	0.72	0.81

A diferencia de los casos anteriormente analizados, en el AIA Volcán se apreció que en la mayoría de los casos los VAF, aunque cercanos a la unidad, fueron menores a 1. Los valores estarían asociados a las diferencias en la medición de la altura de escurrimiento entre el perfil topobatimétrico y el perfil de aforo (diferencias menores en este caso, respecto a, por ejemplo, las medidas en el río Maipo) y a los resultados de la calibración, ya que las alturas utilizadas por el modelo corresponden a las alturas calibradas. Cabe destacar que al ser menor el flujo y su velocidad, no se apreció una condición turbulenta a lo largo del tramo cómo en los otros ríos evaluados, por lo que la altura de escurrimiento medida por el aforo fue menor a la del perfil topobatimétrico en algunas secciones. Las mayores diferencias se observaron en el perfil 7 (VAF = 0.72). A modo de ejemplo, en la Figura 108 se comparan las secciones transversales medidas por los perfiles topobatimétricos y de aforo, para el perfil 5, observándose una menor altura de escurrimiento medida en el aforo (diferencias menores a 5 cm). Esta información es complementada con una fotografía del sector de aforo, presentada en la Figura 109, donde se aprecia la menor turbulencia del flujo.

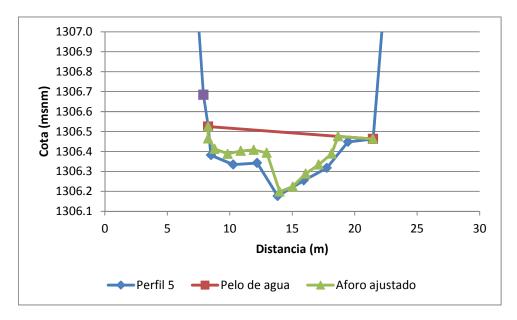


Figura 108.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido por aforador en perfil 5 en AIA Volcán. (Fuente: Elaboración propia).



Figura 109.- Imagen de tramo aguas debajo de perfil 5 en AIA Volcán. (Fuente: Imagen proporcionada por el Mandante).

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 110**.



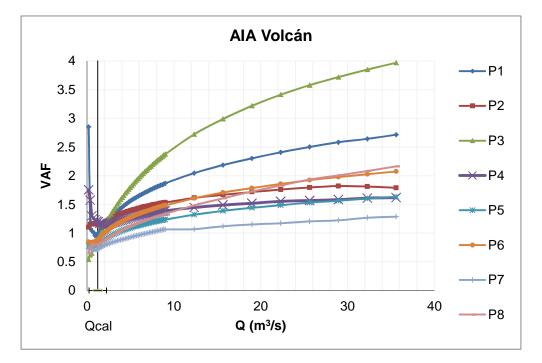


Figura 110.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en AIA Volcán. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como para las AIA analizadas en los puntos anteriores, se observó una tendencia general de aumento del valor del VAF con el caudal, salvo para los caudales más pequeños, en los que, en algunos casos particulares, hubo tendencias decrecientes o irregulares en la relación entre ambos parámetros.

4.5.8 AIA Colina

De acuerdo a lo expuesto en la **Tabla 48**, 7 de los 9 perfiles topobatimétricos presentaron aforo simultáneo asociado, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 7 perfiles.

Las velocidades máximas variaron entre 1 m/s y 1.2 m/s. En los perfiles para los cuales el perfil de velocidad fue modelado, se obtuvieron velocidades máximas de 2 m/s (perfil 4, ubicado en torno a una caída de agua) y de 0.45 m/s (perfil 4a, ubicado en una poza bajo la caída de agua). A modo de ejemplo, en la **Figura 111** se presenta la distribución de velocidades del perfil 6 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 1.03 y 1.44, y se presentan en la **Tabla 68**.



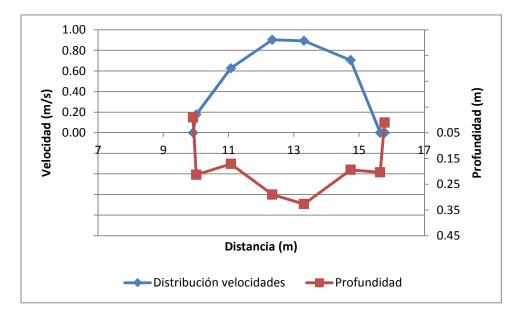


Figura 111.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 6, AIA Colina. (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 68.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en AIA Colina para caudal de calibración = 1.35 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1	2	3	4a	4	5	6	7	8
VAF	1.22	1.23	1.41	1.05	1.13	1.44	1.17	1.03	1.31

Los valores obtenidos del VAF fueron altos, en comparación con las AIA previamente analizadas, en particular en los perfiles 3 y 5. Pese a esto, las diferencias entre las mediciones topobatimétricas y el aforo fueron menores a las obtenidas en otras AIA, como las del río Maipo. Los resultados estarían relacionados con las diferencias entre los perfiles medidas y los calibrados (las diferencias entre las alturas medidas y calibradas fueron de 16% y 13% en perfiles 3 y 5, respectivamente) y posiblemente con que la resolución del perfil topobatimétrico (número de puntos medidos y ubicación de los mismos respecto al aforo) podría afectar los resultados de la modelación con PHABSIM, si es que los puntos de la batimetría no coinciden con las velocidades máximas medidas (ver **Figura 112**).

A modo de ejemplo, en la **Figura 112** se comparan las secciones transversales medidas por los perfiles topobatimétricos y de aforo para el perfil 3, observándose una diferencia del orden de 10 cm, la que podría deberse a la turbulencia del sector, debido a la alta pendiente de fondo (del orden de 4% en promedio para el AIA). Esta información es complementada con una fotografía del sector de aforo, presentada en la **Figura 113**, donde se aprecia la turbulencia del flujo.

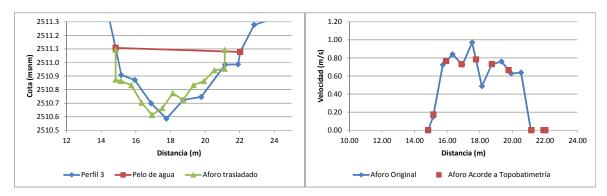
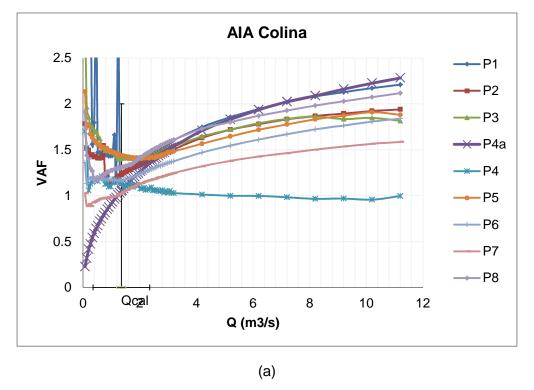


Figura 112.- (Izquierda) Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido por aforador y (derecha) perfil transversal de velocidad medido (línea contínua) y utilizado para modelación (punteado), en perfil 3 en AIA Colina. (Fuente: Elaboración propia).



Figura 113.- Imagen de tramo aguas debajo de perfil 3 en AIA Colina. (Fuente: Imagen proporcionada por el Mandante).

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 114**.



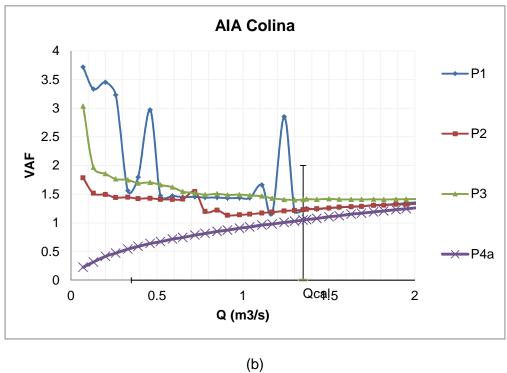


Figura 114.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en AIA Colina (a) Tramo completo; (b) Tramo desde perfil 4a hacia aguas abajo, para caudales bajos . (Fuente: Elaboración propia).



Tal como para las AIA analizadas en los puntos anteriores, se observó una tendencia general de aumento del valor del VAF con el caudal, salvo para los caudales más pequeños, en los que, en algunos casos particulares, hubo tendencias decrecientes o irregulares en la relación entre ambos parámetros. Por otra parte, en la relación VAF v/s caudal se apreció la inestabilidad indicada para el perfil 1 para caudales menores al de calibración, justificando su eliminación (para ese rango de caudales) en la modelación de hábitat.

4.5.9 AIA Morado

De acuerdo a lo expuesto en la **Tabla 51**, los 8 perfiles topobatimétricos presentaron aforo simultáneo asociado, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 8 perfiles.

Las velocidades máximas alcanzaron hasta 1.8 m/s (perfiles 7 y 8). A modo de ejemplo, en la **Figura 115** se presenta la distribución de velocidades del perfil 7 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

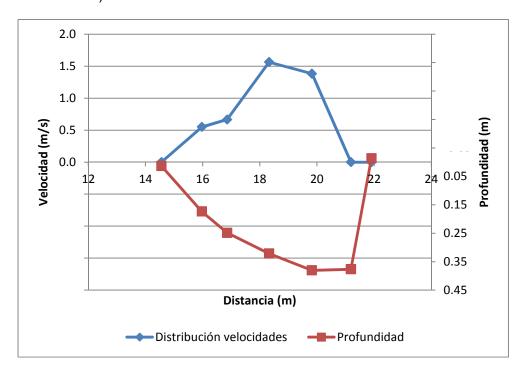


Figura 115.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 7, AIA Morado. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para



cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 0.59 y 0.98, y se presentan en la **Tabla 69**.

Tabla 69.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en AIA Morado para caudal de calibración = 1.45 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8
VAF	0.77	0.85	0.79	0.96	0.90	0.91	0.59	0.98

Tal cómo en el caso del río Volcán, los valores del VAF fueron menores a la unidad, estando relativamente cerca de esta, con excepción de los perfiles 1, 3 y particularmente el perfil 7. En el caso del perfil 1, se debe a diferencias del perfil de aforo y el topobatimétrico, las que se habrían producido por las mismas razones expuestas para el caso del río Volcán (diferencias en el equipo de medición), mientras que para el perfil 7, el valor del VAF se debería a los resultados de la calibración. En cuanto al perfil 3, se daría una combinación de ambas situaciones. A modo de ejemplo en la **Figura 116** se comparan las secciones transversales medidas por los perfiles topobatimétricos y de aforo para el perfil 3.

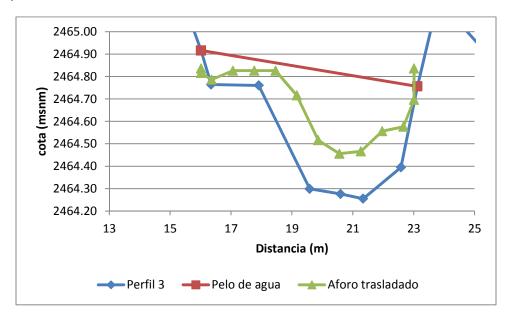


Figura 116.- Comparación perfil topobatimétrico y perfil medido por aforador en perfil 3 en AIA Morado. (Fuente: Elaboración propia).

La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 117**.



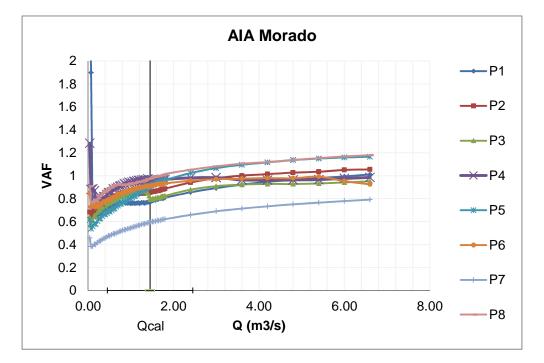


Figura 117.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en AIA Morado. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como para las AIA analizadas en los puntos anteriores, se observó una tendencia general de aumento del valor del VAF con el caudal, salvo para los caudales más pequeños, en los que, en algunos casos particulares, hubo tendencias decrecientes o irregulares en la relación entre ambos parámetros. En este rango también fue apreciado el efecto de la inestabilidad de la modelación en el perfil 1, que desaconsejan su uso en la modelación del hábitat, al menos para dichos caudales.

4.5.10 AIA Placas

Fueron realizados aforos en los 8 perfiles topobatimétricos, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 8 perfiles. No obstante, dado que el perfil 1 fue desestimado para la calibración y modelación, solamente fue considerada la información para los 7 perfiles restantes.

Las velocidades máximas fueron las menores de entre todos los tramos evaluados, alcanzándose valores máximos del orden de 0.45 m/s (perfiles 5 y 6). A modo de ejemplo, en la **Figura 118** se presenta la distribución de velocidades del perfil 6 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. En esta se puede observar cómo existe flujo solamente en el tramo derecho de la sección, en un ancho de no más de 80 cm. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

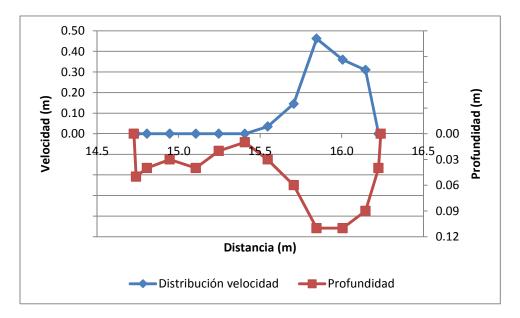


Figura 118.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 6, AIA Placas. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 0.62 y 1.2, y se presentan en la **Tabla 70**.

Tabla 70.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en AIA Placas para caudal de calibración = 0.2 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8
VAF	-	1.05	1.20	0.74	0.62	1.09	1.07	1.12

Los valores obtenidos del VAF estuvieron relativamente cercanos a la unidad, con algunas excepciones particulares (perfiles 4 y 8). Considerando que la sección transversal utilizada en la modelación correspondió a la del perfil aforado en vez del perfil topobatimétrico, las desviaciones respecto a la unidad se deberían fundamentalmente a los resultados de la calibración (la diferencia entre la profundidad medida y simulada para los perfiles 4 y 5 fue la mayor entre todos los perfiles. Ver **Tabla 57**).



La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la **Figura 119**.

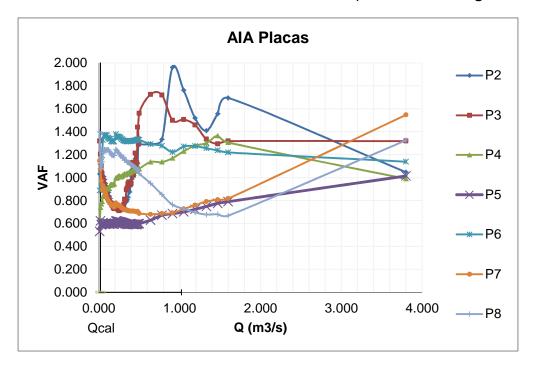


Figura 119.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en AIA Placas. (Fuente: Elaboración propia).

Así como sucedió con la relación Q v/s n, y por los mismos motivos, la relación VAF v/s Q no siguió la tendencia general de aumento del VAF con el caudal cómo condición general. Así, esta relación se dio de acuerdo a las particularidades de cada uno de los perfiles, situación generada por la relación entre la morfología (forma de la sección transversal y pendiente longitudinal) y la baja escala (en términos de caudal y de tamaño de la sección) con la que se trabajó. Por lo mismo, para verificar la calibración y mejorar la estimación de la modelación, se requiere de información de aforos y pelos de agua para caudales mayores. Por otra parte, se verificó lo señalado anteriormente respecto a las inconsistencias de la modelación para cierto rango de caudales en los perfiles 2 y 3, por lo que debe ser evaluada su influencia en la modelación del hábitat (análisis incluido en **Acápite** 4.6.10).

4.5.11 AIA Engorda

Fueron realizados aforos en los 8 perfiles topobatimétricos, por lo que se contó con el perfil transversal de la velocidad de escurrimiento en esos 8 perfiles. Tal como para el estero las Placas, debido a su mayor resolución respecto al topobatimétrico, el perfil del aforo fue utilizado para representar la sección transversal del cauce (ver **Acápite** 4.3.11).



Las velocidades máximas alcanzaron hasta 1.4 m/s (perfiles 5 y 6). A modo de ejemplo, en la **Figura 120** se presenta la distribución de velocidades del perfil 7 utilizada en el modelo, en conjunto con la sección transversal. Las velocidades para los perfiles restantes se presentan en el **Anexo I** (valores aforados) y **Anexo IV.4** (valores ingresados a modelo PHABSIM).

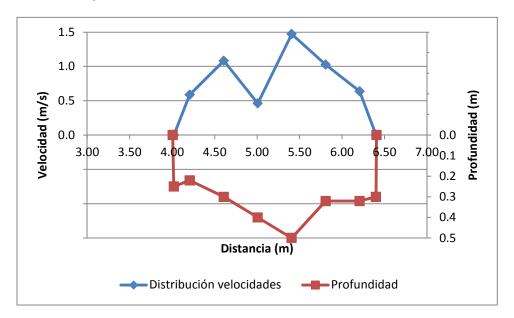


Figura 120.- Sección transversal y perfil de distribución de velocidades en Perfil 5, AIA Engorda. (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó en la metodología, para la determinación del perfil transversal de velocidades en PHABSIM, fue considerado el resultado obtenido de la calibración del eje hidráulico. Con este resultado fue determinado el factor de ajuste de la velocidad para cada uno de los perfiles medidos, además del determinado por HEC-RAS. Los valores del VAF para los perfiles medidos variaron entre 0.87 y 1.36, y se presentan en la **Tabla 71**.

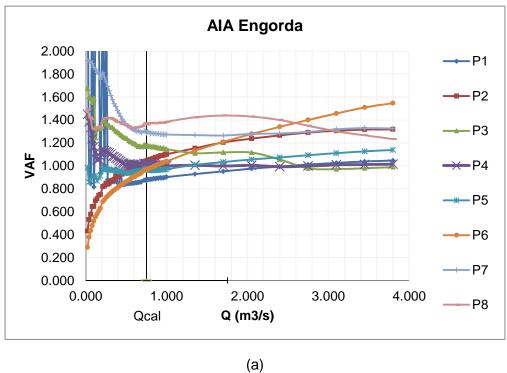
Tabla 71.- VAF determinado por PHABSIM para perfiles en AIA Engorda para caudal de calibración = 0.75 m³/s. (Fuente: Elaboración propia).

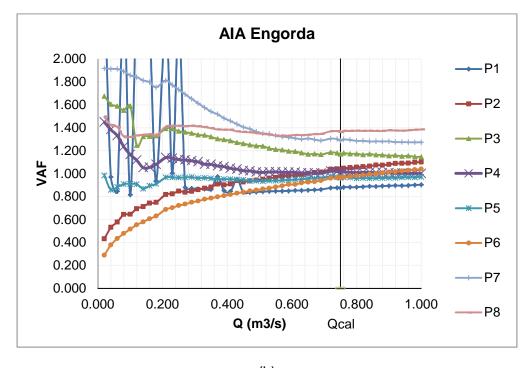
Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8
VAF	0.87	1.04	1.17	1.01	0.96	0.96	1.29	1.36

Los valores obtenidos del VAF estuvieron relativamente cercanos a la unidad, con algunas excepciones particulares (por ejemplo, el perfil 8). Considerando que la sección transversal utilizada en la modelación correspondió a la del perfil aforado en vez del perfil topobatimétrico, las desviaciones respecto a la unidad se deberían fundamentalmente a los resultados de la calibración (la diferencia entre la profundidad medida y simulada para el perfil 8 fue de un 10%).



La modelación de la distribución de velocidades para diferentes caudales permitió obtener una serie de VAF v/s caudal. Los resultados de la serie se presentan en la Figura 121.





(b)



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Figura 121.- Relación VAF v/s caudal para secciones transversales medidas en AIA Engorda. (a) Serie completa de caudales modelados; (b) Zoom a caudales menores (Fuente: Elaboración propia).

Tal como para las AIA analizadas en los puntos anteriores, se observó una tendencia general de aumento del valor del VAF con el caudal, salvo para los caudales más pequeños, en los que, en algunos casos particulares, hubo tendencias decrecientes o irregulares en la relación entre ambos parámetros. En este rango también fue apreciado el efecto de la inestabilidad de la modelación en el perfil 1, que desaconsejan su uso en la modelación del hábitat, al menos para dichos caudales. Se aprecia para este perfil que las irregularidades se concentran fundamentalmente en los caudales menores a 0.26 m³/s y que las alteraciones para caudales superiores (hasta 0.43 m³/s, ver modelación hidráulica, **Acápite** 4.4.11) serían menores.



4.6 Modelación del hábitat

En el río Maipo fue identificada la presencia de fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos. Según lo señalado en la metodología, la fauna íctica corresponde a los salmónidos Salmo trutta, Oncorhynchus mykiss y la especie nativa Trichomycterus areolatus, todos en estado juvenil y adulto. En el caso de los macroinvertebrados bentónicos, los principales órdenes presentes corresponden a Ephemeropteros, Plecópteros y Trichopteros, de los cuales se evaluó la habitabilidad potencial bajo diferentes condiciones hidrológicas.

En cuanto a los ríos y esteros asociados a las AIA fuera de río Maipo, se identificó principalmente la presencia de macroinvertebrados bentónicos y en menor medida la de peces. Es así como solamente en las AIA Yeso y Colorado en Maitenes se identificaron las especies *Oncorhynchus mykiss* y *Trichomycterus areolatus* (Colorado-Maitenes), así como Salmo trutta (Yeso). Para todas estas especies se evaluó la habitabilidad potencial bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Tal como se señaló en la metodología, fueron considerados los criterios definidos por Hudson *et al.* (2003) en cuanto a la discusión de caudales ecológicos bajo la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), que evalúan el hábitat potencial desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema. Los resultados se presentan a continuación, diferenciados por AIA.

4.6.1 AIA Lajas

Las curvas de hábitat ponderado para la fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Lajas se presentan en la **Figura 122** a **Figura 125**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 72** y **Tabla 73**, para cada una de las especies presentes en la AIA Lajas.

Respecto a la **fauna íctica**, los resultados para **salmo trutta** (trucha café) indican que para el estadio juvenil se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio adulto, tal como se muestra en la **Figura 122**. Esta mejor condición está relacionada con las características hidráulicas presentes en la AIA, pero particularmente con la mejor habitabilidad del estadio juvenil para sustratos del tipo grava (S=1.00) respecto al estadio adulto (S=0.54), el cual corresponde al tipo de sustrato presente en la AIA Lajas (ver **Figura 15**). De hecho, si se comparan los valores de WUA en el óptimo se obtiene que WUA_{juvenil}/WUA_{adulto}=2.0, valor similar a la relación de habitabilidades asociadas al sustrato (1.00/0.54=1.9).

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas en la AIA y la forma de las curvas de

habitabilidad para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 15**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la velocidad.

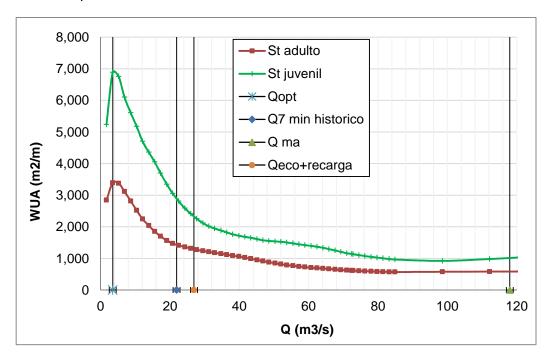


Figura 122.- Hábitat ponderado útil para la especie *salmo trutta* juvenil y adulto en AIA Lajas. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados para *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoiris) indican que para el estadio adulto se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio juvenil, tal como se muestra en la **Figura 123**. Esta mejor condición está relacionada con las características hidráulicas presentes en la AIA, pero particularmente con la mejor habitabilidad del estadio adulto para sustratos del tipo grava (S=0.75) respecto al estadio juvenil (S=0.21), el cual corresponde al tipo de sustrato presente en la AIA Lajas (ver **Figura 16**). Adicionalmente existe influencia de la variable velocidad de la corriente, ya que las curvas de habitabilidad muestran una mejor tolerancia a esta variable para el estadio adulto que para el juvenil.

En cuanto a la forma de la curva para Om adulto, ésta presenta un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Para Om juvenil ocurre una situación similar, salvo por el primer tramo de la curva (caudales bajos), donde se tiene el mayor WUA, el que disminuye con el aumento de caudal.



El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas en la AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad, para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 16**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la velocidad.

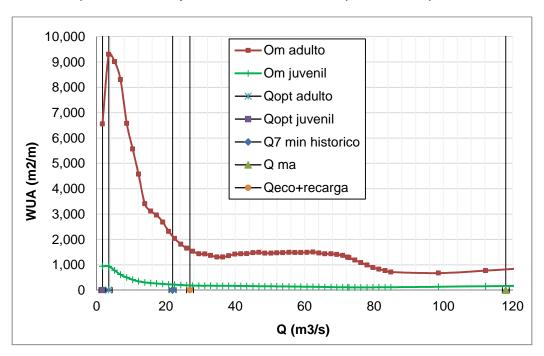


Figura 123.- Hábitat ponderado útil para la especie *Oncorhynchus mykiss* juvenil y adulto en AIA Lajas. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados para *Trichomycterus areolatus* (bagre) indican que para el estadio adulto se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio juvenil, tal como se muestra en la **Figura 124**. Esta condición está relacionada con las características hidráulicas de la AIA y con la profundidad del agua preferente para el desarrollo del bagre. Si bien en ambos casos esta profundidad es baja (<0.6m), el estadio juvenil requiere de una profundidad mayor a 0.1 m para desarrollarse, según lo señalado en la respectiva curva de habitabilidad (ver **Figura 17**), lo que implica una menor disponibilidad de WUA, especialmente para caudales bajos. Esto no se replica para el estadio adulto, cuya curva de habitabilidad para la variable profundidad no señala una profundidad mínima.

En cuanto a la forma de las curvas para *Trichomycterus areolatus*, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}).

El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas de la AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad, para las



variables velocidad y profundidad (ver **Figura 17**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la profundidad.

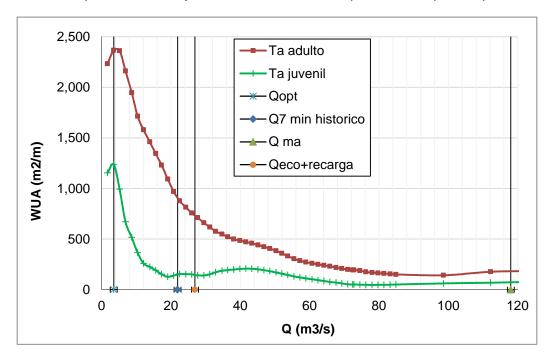


Figura 124.- Hábitat ponderado útil para la especie *Trichomycterus areolatus* juvenil y adulto en AIA Lajas. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

En términos generales, los resultados de hábitat ponderado útil para la fauna íctica son consistentes con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó mayor presencia de salmónidos que de bagre, lo cual se debería a que este tipo de hábitat resulta restrictivo para el desarrollo de esta última especie.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 125.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}).

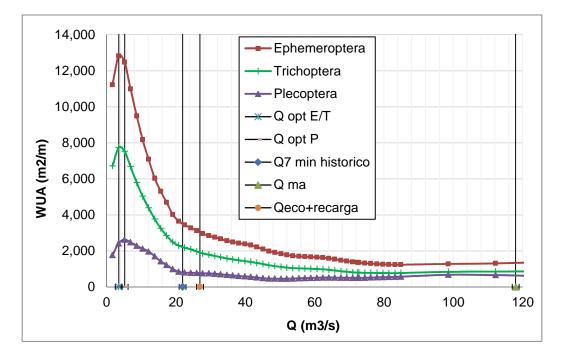


Figura 125.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en AIA Lajas. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 72.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica en AIA Lajas para distintos caudales característicos. (Fuente: Elaboración propia).

Caudales característicos		WUA (m²/m)									
Caudales caracteristicos	St adulto	St juvenil	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil					
Q _{hab opt} *	3,391	6,890	9,299	941	2,367	1,238					
Q _{7 min} *	1,435	2,899	2,135	221	910	149					
Q _{ma} *	589	1,018	819	164	180	74					
Q _{eco+R} *	1,294	2,330	1,586	183	733	146					
Q ₁₅ %**	720	1,398	1,469	133	268	106					
Q ₅₀ %**	905	1,579	1,460	154	414	186					
Q ₈₅ %**	1,173	1,937	1,354	172	574	174					

^{*} Caudales se presentan en Tabla 74.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.



Tabla 73.- Hábitat ponderado útil de macroinvertebrados bentónicos en AIA Lajas para distintos caudales característicos. (Fuente: Elaboración propia).

Caudales característicos		WUA (m²/m)	
Caudales caracteristicos	Ephemeroptera	Trichoptera	Plecoptera
Q _{hab opt} *	12,822	7,730	2,624
Q _{7 min} *	3,514	2,220	813
Q _{ma} *	1,338	859	635
Q _{eco+R} *	3,029	1,909	766
Q ₁₅ %**	1,633	987	501
Q ₅₀ %**	1,978	1,193	475
Q ₈₅ %**	2,640	1,637	694

Tabla 74.- Caudales característicos en AIA Lajas asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 72** y **Tabla 73** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	St adulto	St juvenil	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil	Eph.	Trich.	Plec.	
Q _{7 min historico} (m³/s)					21.9		•			
Q _{ma} (m ³ /s)		118								
Q _{eco+recarga} (m ³ /s)		26.92								
Q _{opt} (m ³ /s)	3.5	3.5	3.5	1.7	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	

A modo de ejemplo, en la **Figura 126** se presentan los resultados en perfil para toda la AIA Lajas de *salmo trutta* adulto para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico más recarga (ver **Acápite 3.2.3**). En esta figura se puede observar la disminución del WUA con el aumento de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

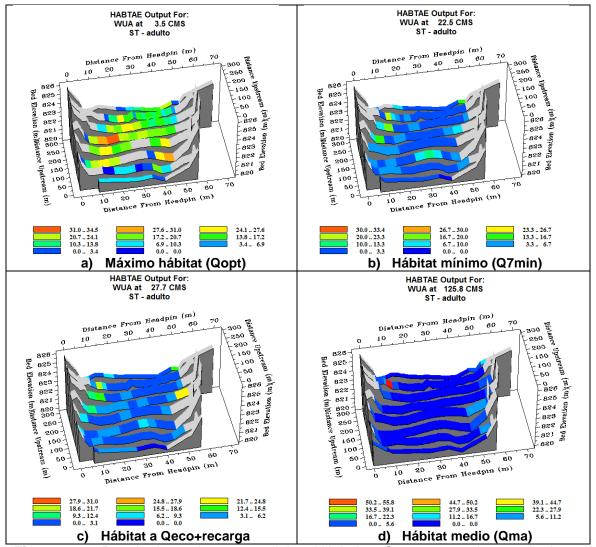


Figura 126.- Resultados *salmo trutta* adulto, AIA Lajas. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Para analizar los resultados de WUA en función del caudal desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema, Hudson *et al.* (2003) mencionan los siguientes lineamientos:

- Mantener niveles de hábitat óptimo,
- Mantener el hábitat, o un porcentaje de éste, que se produzca bajo condiciones medias de caudal,
- Proveer un hábitat mínimo,
- Seleccionar un punto de inflexión dentro de la curva WUA/Q. Esto es, aquel caudal para el cual una disminución de éste en una cierta magnitud significa una pérdida de hábitat mayor al que se ganaría si se incrementara el caudal en la misma proporción.



Bajo estas consideraciones, se realizó un análisis que permitió establecer la relación del caudal ecológico definido por DGA en bocatoma, sumadas las recargas de la cuenca hasta la AIA Lajas, respecto a los lineamientos señalados, además de las condiciones hidrológicas actuales.

De esta forma, se establecen los siguientes criterios de verificación:

- ¿El caudal que produce el máximo hábitat ha ocurrido en condiciones actuales? Este criterio se verifica comparando el Qopt (máximo hábitat) con el caudal mínimo histórico de 7 días (Q_{7min}), considerado representativo de una condición de hábitat mínimo. Este criterio permite determinar si la condición de hábitat óptimo es posible en un escenario hidrológico actual.
- 2. ¿El hábitat asociado a Qecol+recarga es menor que el hábitat del Qmedio anual? Esto permite comparar la condición de hábitat que produce el caudal ecológico, respecto a una que ocurre bajo condiciones hidrológicas medias anuales.
- 3. ¿El caudal ecológico+recarga es menor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min})? Esto permite verificar si el caudal ecológico producirá sobre el río una condición hidrológica que naturalmente no ha ocurrido.
- 4. ¿Cuál es el caudal que produce una inflexión de la curva WUA/Q?

Los resultados presentados en la **Figura 127** indican que ninguna de las especies evaluadas presenta una condición de hábitat óptimo que haya ocurrido en un escenario hidrológico actual. De hecho, en términos promedio para todas las especies evaluadas, la condición de hábitat máximo ocurre para un caudal que es 18 m³/s menor al caudal mínimo histórico. Estos resultados son consistentes con lo esperado para ríos como el Maipo, donde la baja presencia de peces se corresponde con el patrón natural de los sistemas acuáticos que ocurre en respuesta a una menor disponibilidad de hábitats y un menor nivel de trofía en zonas altas, en comparación a zonas media y baja de los sistemas fluviales (Vannote *et al.* 1980, Welcomme 1985).

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados indican que el hábitat que éste produce es mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma decreciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 122** a **Figura 125**). El WUA bajo la condición de Q_{eco+recarga} es en promedio el doble del WUA para Q_{ma} para la mayoría de las especies evaluadas, a excepción de Om_{juvenil} y Plecoptera, donde ambos hábitat se diferencian entre un 12 a 20%.

Asimismo, se verifica que en la AIA Lajas el caudal ecológico definido en bocatoma más recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición naturalmente conocida en términos



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{7min} es de 5 m³/s en la AIA Lajas, mientras que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{ma} es de 91 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Lajas, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

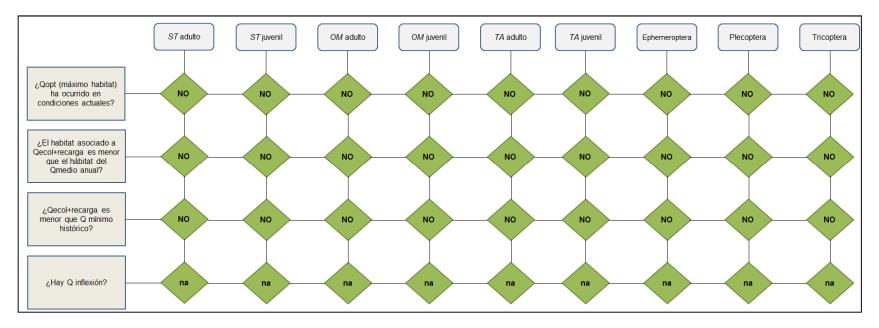


Figura 127.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Lajas. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.2 AIA Toyo

Las curvas de hábitat ponderado para la fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Toyo se presentan en la **Figura 128** a **Figura 130**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 75**, para cada una de las especies presentes en la AIA Toyo.

Respecto a la **fauna íctica**, los resultados para *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoiris) indican que para el estadio adulto se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio juvenil, tal como se muestra en la **Figura 128**. Esta mejor condición está relacionada con las características hidráulicas presentes en la AIA, pero particularmente con la mejor habitabilidad del estadio adulto para sustratos del tipo grava (S=0.75) respecto al estadio juvenil (S=0.21), el cual corresponde al tipo de sustrato presente en la AIA Lajas (ver **Figura 16**). Adicionalmente existe influencia de la variable velocidad de la corriente, ya que las curvas de habitabilidad muestran una mejor tolerancia a esta variable para el estadio adulto que para el juvenil.

En cuanto a la forma de la curva para Om adulto, ésta presenta un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Para Om juvenil ocurre una situación similar, salvo por el primer tramo de la curva (caudales bajos), donde se tiene el mayor WUA, el que disminuye con el aumento de caudal.

El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas en la AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad, para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 16**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la velocidad.

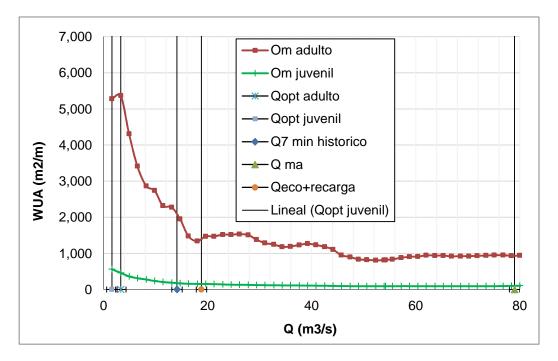


Figura 128.- Hábitat ponderado útil para la especie *Oncorhynchus mykiss* juvenil y adulto en AIA Toyo. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados para *Trichomycterus areolatus* (bagre) indican que para el estadio adulto se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio juvenil, tal como se muestra en la **Figura 129**. Esta condición está relacionada con las características hidráulicas de la AIA y con la profundidad del agua preferente para el desarrollo del bagre. Si bien en ambos casos esta profundidad es baja (<0.6m), el estadio juvenil requiere de una profundidad mayor a 0.1 m para desarrollarse, según lo señalado en la respectiva curva de habitabilidad (**Figura 17**), lo que implica una menor disponibilidad de WUA, especialmente para caudales bajos. Esto no se replica para el estadio adulto, cuya curva de habitabilidad para la variable profundidad no señala una profundidad mínima.

En cuanto a la forma de las curvas para *Trichomycterus areolatus*, éstas comienzan en el WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas de la AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad, para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 17**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la profundidad.

En términos generales, los resultados de hábitat ponderado útil para la fauna íctica son consistentes con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó mayor presencia de salmónidos que de bagre, lo cual se debería a que este tipo de hábitat resulta restrictivo para el desarrollo de esta última especie.

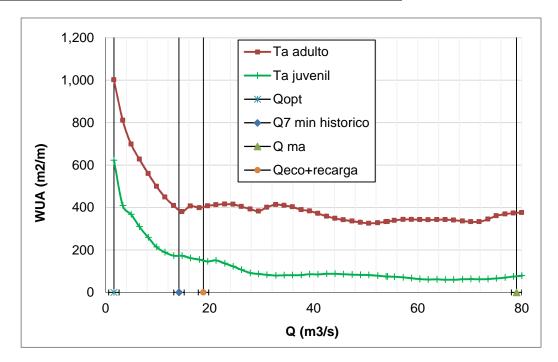


Figura 129.- Hábitat ponderado útil para la especie *Trichomycterus areolatus* juvenil y adulto en AIA Toyo. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 130**. Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}).

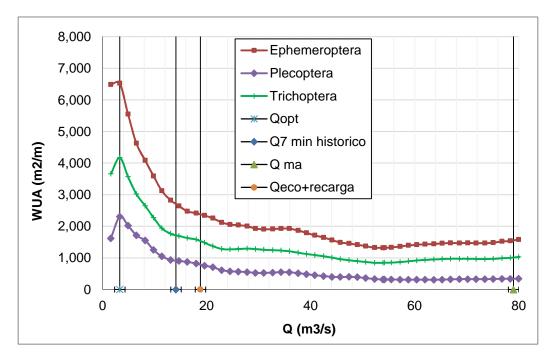


Figura 130.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en AIA Toyo. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 75.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Toyo para distintos caudales característicos.

Caudales	WUA (m²/m)						
característicos	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil	Ephemeroptera	Plecoptera	Trichoptera
Q _{hab opt} *	5,367	562	1,002	623	6,523	2,307	4,172
Q _{7 min} *	2,074	177	392	173	2,711	917	1,721
Q _{ma} *	938	103	375	77	1,553	343	1,012
Q _{eco+R} *	1,406	155	404	150	2,379	789	1,531
Q ₁₅ %**	1,192	108	377	85	1,759	476	1,115
Q ₅₀ %**	1,320	122	401	84	1,933	537	1,261
Q ₈₅ %**	1,437	151	408	149	2,292	732	1,439

^{*} Caudales se presentan en Tabla 76.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.



Tabla 76.- Caudales característicos en AIA Toyo asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 75** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil	Eph.	Tric.	Plec.
Q _{7 min historico} (m³/s)		14.1					
Q ma (m ³ /s)		79					
Q _{eco+recarga} (m ³ /s)		18.81					
Q _{opt} (m³/s)	3.3	1.6	1.6	1.6	3.3	3.3	3.3

Cabe señalar que no fue posible generar resultados gráficos del WUA para toda la AIA Toyo, dadas las limitaciones gráficas de PHABSIM al manejar una mayor cantidad de perfiles.

Para analizar los resultados de WUA en función del caudal desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema, se aplicaron los mismos criterios señalados en la metodología y **Acápite** 4.6.1.

Los resultados presentados en la **Figura 131** indican que ninguna de las especies evaluadas presenta una condición de hábitat óptimo que haya ocurrido en un escenario hidrológico actual. De hecho, en términos promedio para todas las especies evaluadas, la condición de hábitat máximo ocurre para un caudal que es 12 m³/s menor al caudal mínimo histórico. Estos resultados son consistentes con lo esperado para ríos como el Maipo, donde la baja presencia de peces se corresponde con el patrón natural de los sistemas acuáticos que ocurre en respuesta a una menor disponibilidad de hábitats y un menor nivel de trofía en zonas altas, en comparación a zonas media y baja de los sistemas fluviales (Vannote *et al.* 1980, Welcomme 1985).

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados indican que el hábitat que éste produce es mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma decreciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 128** a **Figura 130**). El WUA bajo la condición de Q_{eco+recarga} es en promedio 1.7 veces mayor al WUA para Q_{ma} para la mayoría de las especies evaluadas, a excepción de Ta_{adulto}, donde ambos hábitat se diferencian en un 10%.

Asimismo, se verifica que en la AIA Toyo el caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición naturalmente conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{7min} es de 4.7 m³/s en la AIA Toyo, mientras que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{ma} es de 60 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Toyo, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

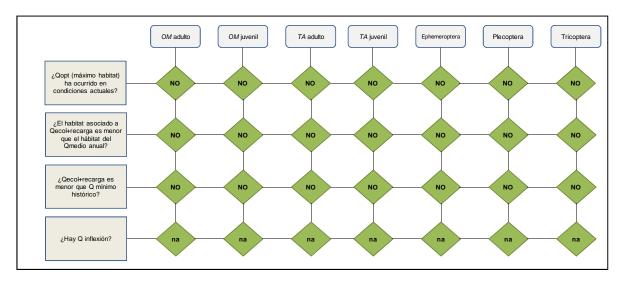


Figura 131.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Toyo. (Fuente: Elaboración propia).

4.6.3 AIA San Alfonso

Las curvas de hábitat ponderado para la fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA San Alfonso se presentan en la **Figura 132** y **Figura 133** respectivamente. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 77**, para cada una de las especies presentes en la AIA San Alfonso.

Respecto a la **fauna íctica**, los resultados para **salmo trutta** (trucha café) indican que para el estadio juvenil se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio adulto, tal como se muestra en la **Figura 132**. Esta mejor condición está relacionada con las características hidráulicas de la AIA y con la mejor habitabilidad del estadio juvenil para sustratos del tipo grava (S=1.00) respecto al estadio adulto (S=0.54), el cual corresponde al tipo de sustrato presente en la AIA San Alfonso (ver **Figura 15**). De hecho, si se comparan los valores de WUA en el óptimo se obtiene que WUA_{juvenil}/WUA_{adulto}=2.2, valor similar a la relación de habitabilidades asociadas al sustrato (1.00/0.54=1.9).

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas de las AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 15**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la velocidad.

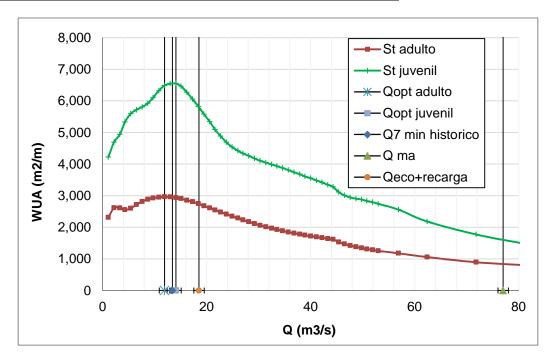


Figura 132.- Hábitat ponderado útil para la especie *salmo trutta* juvenil y adulto en AIA San Alfonso. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 133**. Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de la AIA, la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 16**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Pese a que en términos generales todas las curvas de hábitat de macroinvertebrados son de forma similar, se observa que para el orden Plecoptera la curva se desplaza hacia la derecha, obteniéndose el máximo hábitat para un caudal de 20.6 m³/s, mientras que para los otros órdenes el máximo hábitat se alcanza para un caudal de 8.7 m³/s. Esta situación podría explicarse por la forma de la curva de preferencia de profundidad de Plecoptera, la cual presenta un crecimiento lento en relación a los otros dos órdenes de macroinvertebrados, como puede observarse en la Figura 18, además de las características hidráulicas particulares en la AIA San Alfonso.

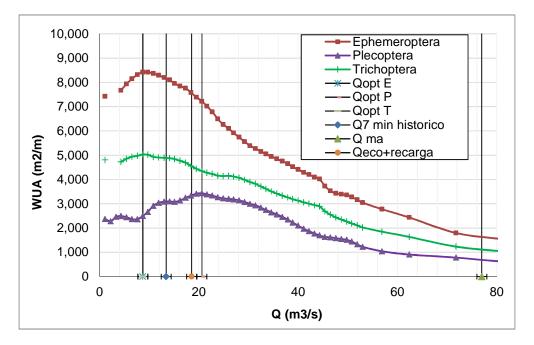


Figura 133.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en AIA San Alfonso. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 77.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA San Alfonso para distintos caudales característicos. (Fuente: Elaboración propia).

Caudales	WUA (m²/m)							
característicos	St adulto	St juvenil	Ephemeroptera	Plecoptera	Trichoptera			
Q _{hab opt} *	2,965	6,548	8,419	3,433	5,030			
Q _{7 min} *	2,952	6,545	8,166	3,089	4,888			
Q _{ma} *	844	1,612	1,655	691	1,127			
\mathbf{Q}_{eco+R}^*	2,740	5,792	7,559	3,344	4,543			
Q ₁₅ %**	1,791	3,688	4,636	2,331	3,284			
Q ₅₀ %**	2,090	4,149	5,498	3,015	3,919			
Q ₈₅ %**	2,666	5,531	7,355	3,366	4,442			

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 78**

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.



Tabla 78.- Caudales característicos en AIA San Alfonso asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 77** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	St adulto	St juvenil	Eph.	Tric.	Plec.
Q _{7 min historico} (m ³ /s)	13.4				
Q ma (m ³ /s)	77				
Q _{eco+recarga} (m ³ /s)	18.53				
Q _{opt} (m ³ /s)	11.9	14.1	8.7	20.6	8.7

A modo de ejemplo, en la **Figura 134** se presentan los resultados en perfil para toda la AIA San Alfonso de *salmo trutta* adulto para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico más recarga (ver **Acápite 3.2.3**). En esta figura se puede observar la disminución del WUA con el aumento de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

Para analizar los resultados de WUA en función del caudal desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema, se aplicaron los mismos criterios señalados en la metodología y **Acápite** 4.6.1.

Los resultados presentados en la **Figura 135** indican que sólo dos de las especies evaluadas presentan una condición de hábitat óptimo que ha ocurrido en un escenario hidrológico actual: *salmo trutta* juvenil y plecópteros. En el caso de *salmo trutta* juvenil, la diferencia entre el caudal mínimo histórico y el caudal que produce el hábitat óptimo es sólo de 0.7 m³/s, mientras que para el orden plecóptera es de 7.2 m³/s. Estos resultados son consistentes con lo esperado para ríos como el Maipo, donde la baja presencia de peces se corresponde con el patrón natural de los sistemas acuáticos que ocurre en respuesta a una menor disponibilidad de hábitats y un menor nivel de trofía en zonas altas, en comparación a zonas media y baja de los sistemas fluviales (Vannote *et al.* 1980, Welcomme 1985).

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados indican que el hábitat que este produce es mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma decreciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 132** y **Figura 133**).

Asimismo, se verifica que en la AIA San Alfonso el caudal ecológico definido en bocatoma más recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición naturalmente conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{7min} es de 5 m³/s en la AIA San Alfonso, mientras que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{ma} es de 58 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

CENTRO DE ECOLOGIA AFLICADA

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA San Alfonso, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

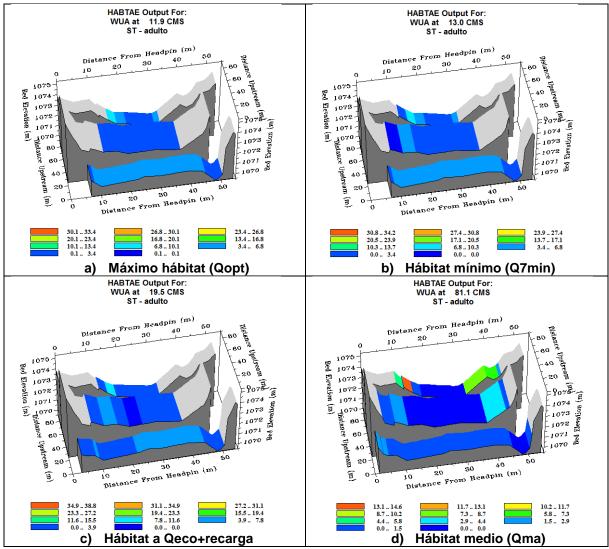


Figura 134.- Resultados salmo trutta adulto, AIA San Alfonso. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).



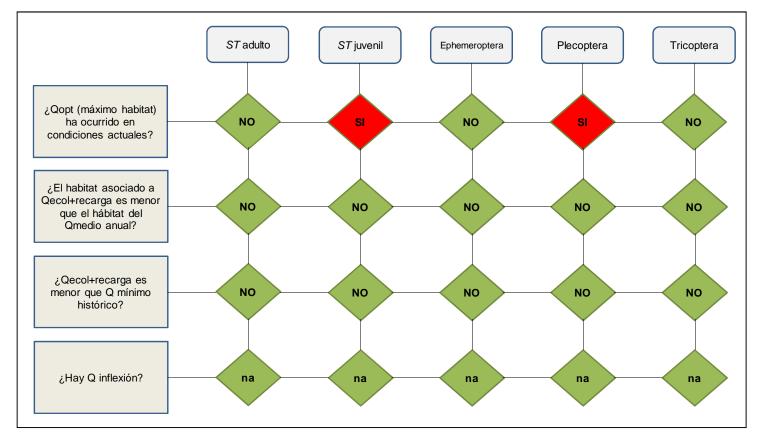


Figura 135.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA San Alfonso. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.4 AIA Colorado en Alfalfal

Las curvas de hábitat ponderado para macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Alfalfal se presentan en la **Figura 136**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 79**. De las especies en evaluación, el estudio de línea de base (CEA, 2013) solamente constató la presencia de macroinvertebrados del orden Ephemeroptera.

En cuanto a la forma de la curva de hábitat, ésta presenta un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un caudal de $2.04~\text{m}^3/\text{s}$, para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a caudales mayores al Q_{ma}).

Cabe señalar que no fue posible generar resultados gráficos del WUA para toda la AIA Alfalfal, dadas las limitaciones gráficas de PHABSIM al manejar una mayor cantidad de perfiles.

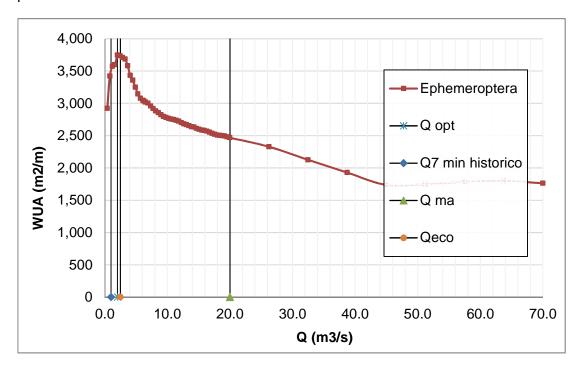


Figura 136.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, en AIA Colorado en Alfalfal. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico. (Fuente: Elaboración propia).



Tabla 79.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AlA Colorado en Alfalfal para distintos caudales característicos.

Caudales característicos	WUA (m²/m)
Caudales Caracteristicos	Ephemeroptera
$Q_{opt} = 2.04 \text{ m}^3/\text{s}$	3,746
$Q_{7 min} = 1 m^3/s$	3,488
Q _{ma} =20 m ³ /s	2,468
$Q_{eco} = 2.51 \text{ m}^3/\text{s}$	3,734
Q ₁₅ %*	2,939
Q ₅₀ %*	3,083
Q ₈₅ %*	3,506

^{*} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.

Los resultados presentados en la **Figura 137** indican que las condiciones de hábitat óptimo para Ephemeroptera se han producido en condiciones actuales, dado que el caudal que produce dicho hábitat es mayor al caudal mínimo histórico, con una diferencia entre ambos de 1.04 m³/s. Cabe señalar que el hábitat ponderado máximo es prácticamente igual al que se produce bajo el caudal ecológico en bocatoma Colorado, siendo la diferencia entre ambos hábitat de 0.3%.

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**) los resultados indican que el hábitat que este produce es mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma decreciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 136**).

Asimismo, se verifica que en la AIA Alfalfal el caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición naturalmente conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{7min} es de 1.51 m³/s en la AIA Alfalfal, mientras que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{ma} es de 17.49 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Alfalfal, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

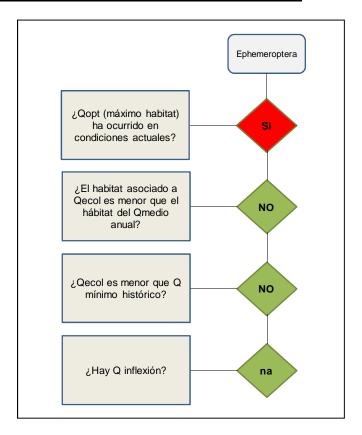


Figura 137.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Colorado en Alfalfal. (Fuente: Elaboración propia).

4.6.5 AIA Colorado en Maitenes

Las curvas de hábitat ponderado para la fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Maitenes se presentan en la **Figura 138** a **Figura 140**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 80**, para cada una de las especies presentes en la AIA Maitenes.

Respecto a la **fauna íctica**, los resultados para *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoiris) indican que para el estadio adulto se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio juvenil, tal como se muestra en la **Figura 138**. Esta mejor condición está relacionada con las características hidráulicas presentes en la AIA, pero particularmente con la mejor habitabilidad del estadio adulto para sustratos del tipo grava (S=0.75) respecto al estadio juvenil (S=0.21), el cual corresponde al tipo de sustrato presente en la AIA Maitenes (ver **Figura 16**). Adicionalmente existe influencia de la variable velocidad de la corriente, ya que las curvas de habitabilidad muestran una mejor tolerancia a esta variable para el estadio adulto que para el juvenil.

En cuanto a la forma de la curva para Om adulto, ésta presenta un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales



altos (en relación a Q_{ma}). Para Om juvenil ocurre una situación similar, salvo por el primer tramo de la curva (caudales bajos), donde se tiene el mayor WUA, el que disminuye con el aumento de caudal.

El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas en la AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad, para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 16**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la velocidad.

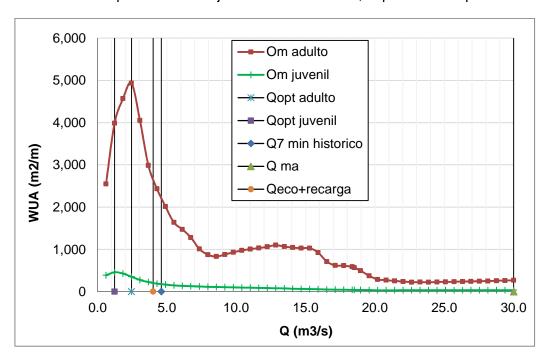


Figura 138.- Hábitat ponderado útil para *Oncorhynchus mykiss* juvenil y adulto, en AIA Maitenes. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados para *Trichomycterus areolatus* (bagre) indican que para el estadio adulto se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio juvenil, tal como se muestra en la **Figura 139**. Esta condición está relacionada con las características hidráulicas de la AIA y con la profundidad del agua preferente para el desarrollo del bagre. Si bien en ambos casos esta profundidad es baja (<0.6m), el estadio juvenil requiere de una profundidad mayor a 0.1 m para desarrollarse, según lo señalado en la respectiva curva de habitabilidad (**Figura 17**), lo que implica una menor disponibilidad de WUA, especialmente para caudales bajos. Esto no se replica para el estadio adulto, cuya curva de habitabilidad para la variable profundidad no señala una profundidad mínima.

En cuanto a la forma de las curvas para *Trichomycterus areolatus*, éstas comienzan en el WUA máximo que ocurre a un valor bajo de caudal (en relación a Q_{7min}), para luego tornarse decreciente hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a



Q_{ma}). El hecho que el máximo WUA se alcance para valores bajos de caudal, responde a las características hidráulicas de la AIA y a la forma de las curvas de habitabilidad, para las variables velocidad y profundidad (ver **Figura 17**), donde las máximas preferencias de hábitat ocurren para valores bajos de estas variables, especialmente para la profundidad.

En términos generales, los resultados de hábitat ponderado útil para la fauna íctica son consistentes con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó mayor presencia de salmónidos que de bagre, lo cual se debería a que este tipo de hábitat resulta restrictivo para el desarrollo de esta última especie.

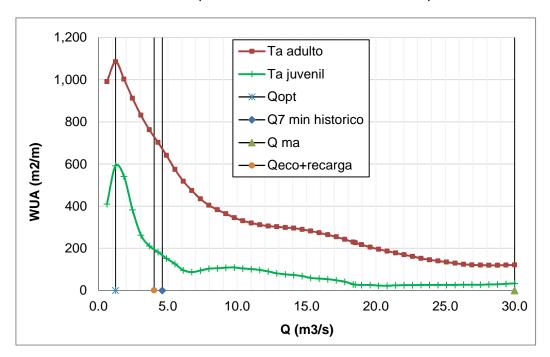


Figura 139.- Hábitat ponderado útil para *Trichomycterus areolatus* juvenil y adulto, en AIA Maitenes. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Trichoptera, seguido de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 140.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}).

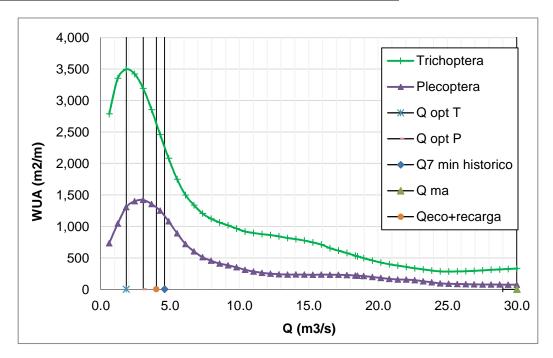


Figura 140.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Trichoptera y Plecoptera, en AIA Maitenes. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 80.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Maitenes para distintos caudales característicos.

Caudales	WUA (m²/m)						
característicos	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil	Plecoptera	Trichoptera	
Q _{hab opt} *	4,932	459	1,085	592	3,496	1,419	
Q _{7 min} *	2,220	178	671	167	2,264	1,163	
Q _{ma} *	270	35	121	33	330	73	
Q _{eco+R} *	2,681	206	729	195	2,634	1,296	
Q ₁₅ %**	952	61	283	64	745	233	
Q ₅₀ %**	1,063	84	306	90	860	250	
Q ₈₅ %**	867	107	372	107	1,036	395	

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 81**.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.



Tabla 81.- Caudales característicos en AIA Maitenes asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 80** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Om adulto	Om juvenil	Ta adulto	Ta juvenil	Tric.	Plec.
Q _{7 min historico} (m ³ /s)			4.6			
Q ma (m ³ /s)		30				
Q _{eco+recarga} (m ³ /s)		4.01				
Q _{opt} (m ³ /s)	2.45	1.23	1.23	1.23	1.84	3.06

A modo de ejemplo, en la **Figura 141** se presentan los resultados en perfil para toda la AIA Maitenes de Trichoptera para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico más recarga (ver **Acápite 3.2.3**). En esta figura se puede observar la disminución del WUA con el aumento de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

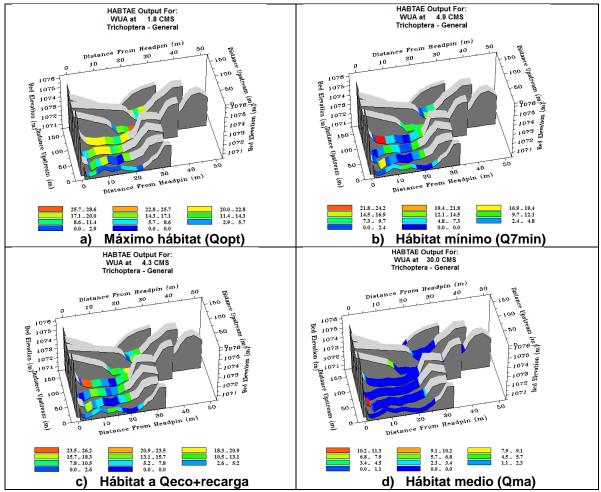


Figura 141.- Resultados Trichoptera, AIA Maitenes. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Los resultados presentados en la **Figura 142** indican que ninguna de las especies evaluadas presenta una condición de hábitat óptimo que haya ocurrido en un escenario hidrológico actual. De hecho, en términos promedio para todas las especies evaluadas, la condición de hábitat máximo ocurre para un caudal que es 2.8 m³/s menor al caudal mínimo histórico. Estos resultados en el río Colorado podrían ser asimilables a lo que ocurre en el río Maipo, donde la baja presencia de peces se corresponde con el patrón natural de los sistemas acuáticos que ocurre en respuesta a una menor disponibilidad de hábitats y un menor nivel de trofía en zonas altas, en comparación a zonas media y baja de los sistemas fluviales (Vannote *et al.* 1980, Welcomme 1985).

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados indican que el hábitat que éste produce es mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma decreciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 138** a **Figura 140**). El WUA bajo la condición de $Q_{\text{eco+recarga}}$ es en promedio 7 veces mayor al WUA para Q_{ma} para la mayoría de las especies evaluadas, a excepción de Ta_{adulto} , donde esta diferencia aumenta a 17 veces.

Asimismo, se verifica que en la AIA Maitenes el caudal ecológico definido en bocatoma más recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**) es menor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición no conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{7min} es de 0.59 m³/s en la AIA Maitenes (con $Q_{eco+recarga} < Q_{7min}$), mientras que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{ma} es de 26 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Maitenes, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

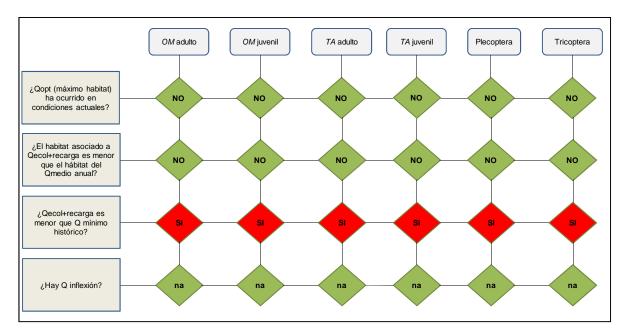


Figura 142.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Maitenes. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.6 AIA Yeso

Las curvas de hábitat ponderado para la fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Yeso se presentan en las **Figura 143** y **Figura 144**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 82**, para cada una de las especies presentes en la AIA Yeso.

Respecto a la **fauna íctica**, los resultados para **salmo trutta** (trucha café) indican que para el estadio juvenil se presenta una mejor condición de hábitat que para el estadio adulto, tal como se muestra en la **Figura 143**. Esta mejor condición está relacionada con las características hidráulicas presentes en la AIA, pero particularmente con la mejor habitabilidad del estadio juvenil para sustratos del tipo grava (S=1.00) respecto al estadio adulto (S=0.54), el cual corresponde al tipo de sustrato presente en la AIA Yeso (ver **Figura 15**).

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA constante (horizontalidad de la curva), lo que ocurre para un caudal aproximado de 3 m^3 /s. A partir de este caudal, la habitabilidad ponderada crece nuevamente y se estabiliza en torno al Q_{ma} . Para caudales mayores a Q_{ma} , el hábitat ponderado nuevamente aumenta. Esa situación puede visualizarse por la forma de las secciones transversales que conforman las AIA, cuya área mojada aumenta significativamente con el incremento del caudal, lo que implica una mayor cantidad de superficie habitable. Esta situación se visualiza en la **Figura 145** (particularmente figuras \mathbf{a} y \mathbf{b}), donde se aprecian las diferencias de superficie mojada para el máximo caudal modelado (32.8 \mathbf{m}^3 /s) y el caudal mínimo histórico (1 \mathbf{m}^3 /s).

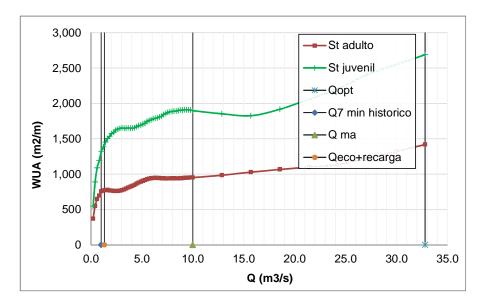


Figura 143.- Hábitat ponderado útil para *Salmo trutta* juvenil y adulto, en AIA Yeso. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 144.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo donde se alcanzan dos máximos y mínimos locales (caudal $< Q_{ma}$), para posteriormente tornarse crecientes a partir de Q_{ma} . Esta situación es similar a la observada en el hábitat potencial de *salmo trutta*, donde el área mojada de las distintas secciones transversales de las AIA aumentan con el incremento del caudal, lo que implica una mayor cantidad de superficie habitable.

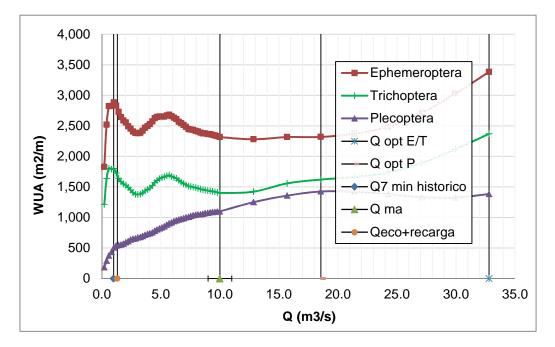


Figura 144.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, en AIA Yeso. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).



Tabla 82.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Yeso para distintos caudales característicos.

Caudales	WUA (m²/m)					
característicos	St adulto	St juvenil	Ephemeroptera	Plecoptera	Trichoptera	
Q _{hab opt} *	1,419	2,688	3,382	2,369	1,425	
Q _{7 min} *	751	1,311	2,877	1,799	499	
Q _{ma} *	952	1,897	2,317	1,401	1,100	
Q _{eco+R} *	771	1,416	2,784	1,687	544	
Q ₁₅ %**	900	1,701	2,652	1,643	831	
Q ₅₀ %**	814	1,652	2,473	1,443	718	
Q ₈₅ %**	770	1,550	2,564	1,529	585	

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 83**.

Tabla 83.- Caudales característicos en AIA Yeso asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 82** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	St adulto	St juvenil	Ephemeroptera	Trichoptera	Plecoptera	
Q _{7 min historico} (m ³ /s)		1.0				
Q ma (m ³ /s)		10.0				
Q _{eco+recarga} (m ³ /s)	1.32					
Q _{opt} (m ³ /s)	32.8	32.8	32.8	32.8	18.6	

A modo de ejemplo, en la **Figura 145** se presentan los resultados en perfil para toda la AIA Yeso de Plecoptera para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico más recarga (ver **Acápite 3.2.3**). En esta figura se puede observar el aumento del WUA con el aumento de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.

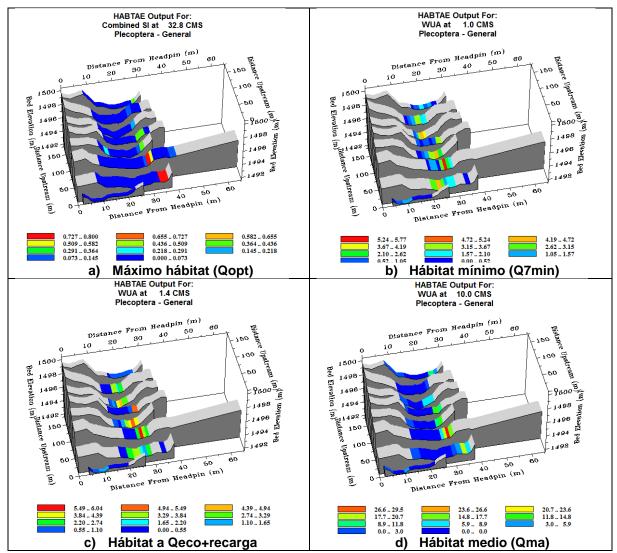


Figura 145.- Resultados Plecoptera, AIA Yeso. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Los resultados presentados en la **Figura 146** indican que, si bien la condición de hábitat óptimo sí ha ocurrido en un escenario hidrológico actual ($Q_{opt}>Q_{min\ histórico}$), se trataría de una condición de baja frecuencia si se le compara con el caudal medio anual ($Q_{opt}>Q_{ma}$), asociada más bien a escenarios de crecidas. De hecho, en términos promedio para todas las especies evaluadas, la condición de hábitat máximo ocurre para un caudal que es 20 m³/s mayor al caudal medio anual

CENTRO DE ECOLOGIA AFLICADA

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados indican que el hábitat que éste produce es menor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma creciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 143** y **Figura 144**). El WUA bajo la condición de Q_{eco+recarga} es en promedio 0.7 veces menor al WUA para Q_{ma} para la mayoría de las especies evaluadas, por lo que un incremento de caudal sí se traduciría en una ganancia de hábitat ponderado. La excepción la constituyen los órdenes Ephemeroptera y Plecoptera, donde el hábitat que se produce a Q_{eco+recarga} es 1.2 veces el que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río

Asimismo, se verifica que en la AIA Yeso el caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición naturalmente conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{7min} es de 0.32 m³/s en la AIA Yeso, mientras que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{ma} es de 8.68 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Yeso, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

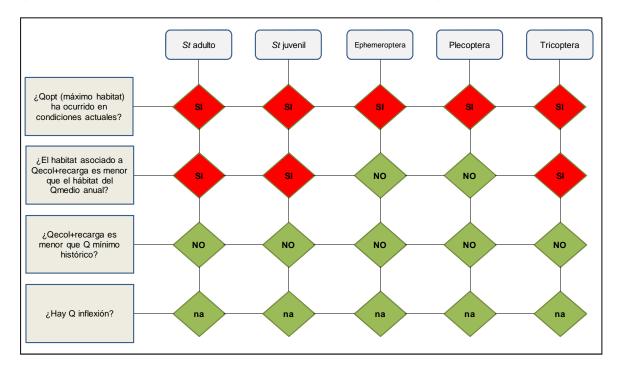


Figura 146.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Yeso. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.7 AIA Volcán

Las curvas de hábitat ponderado para macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Volcán se presentan en la **Figura 147**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 84**, para cada una de las especies presentes en la AIA Volcán.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 147.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}).

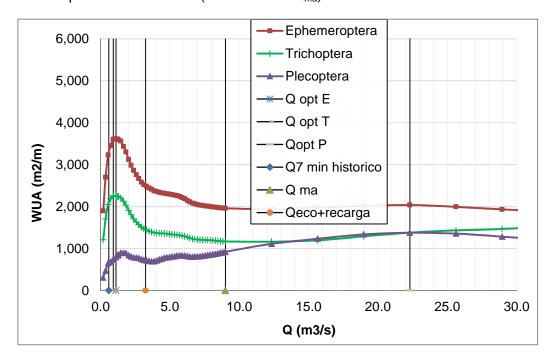


Figura 147.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, en AIA Volcán. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico + recarga en AIA. (Fuente: Elaboración propia).



Tabla 84.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Volcán para distintos caudales característicos.

Caudales	WUA (m²/m)					
característicos	Ephemeroptera	Plecoptera	Trichoptera			
Q _{hab opt} *	3,610	2,255	1,375			
Q _{7 min} *	3,288	2,088	662			
Q _{ma} *	1,959	1,169	922			
Q _{eco+R} *	2,496	1,451	719			
Q ₁₅ %**	3,360	2,073	895			
Q ₅₀ %**	3,578	2,224	873			
Q ₈₅ %**	3,312	2,102	666			

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 85**.

Tabla 85.- Caudales característicos en AIA Volcán asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 84** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Ephemeroptera	Trichoptera	Plecoptera		
Q _{7 min historico} (m³/s)	0.6				
Q _{ma} (m ³ /s)	9.0				
Q _{eco+recarga} (m ³ /s)	3.25				
Q _{opt} (m ³ /s)	1.11	0.92	22.3		

A modo de ejemplo, en la **Figura 148** se presentan los resultados en perfil para toda la AIA Volcán de Ephemeroptera para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico más recarga (ver **Acápite 3.2.3**). En esta figura se puede observar cambio del WUA con el cambio de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.

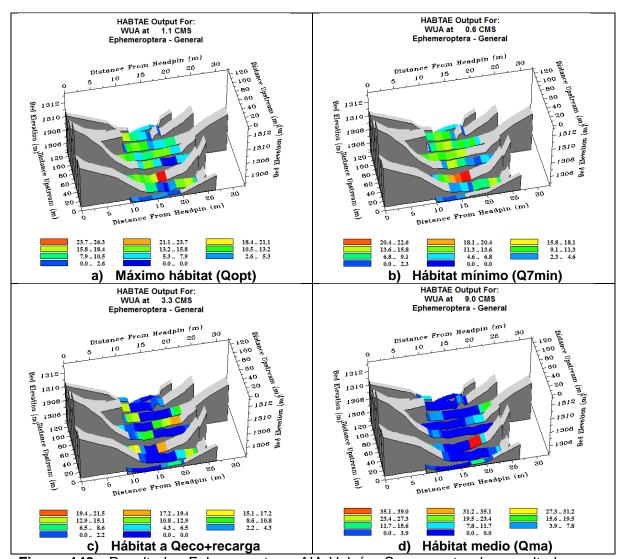


Figura 148.- Resultados Ephemeroptera, AIA Volcán. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Los resultados presentados en la **Figura 149** indican que la condición de hábitat óptimo sí ha ocurrido en un escenario hidrológico actual ($Q_{opt} > Q_{min histórico}$). En el caso de Ephemeroptera y Trichoptera, esta condición se ha dado para caudales cercanos al caudal mínimo histórico, siendo la diferencia $Q_{opt} - Q_{min histórico}$ igual a 0.51 m³/s para Ephemeroptera y 0.32 m³/s para Trichoptera. En el caso de Plecoptera, el caudal que produce el máximo hábitat ponderado es de 22.3 m³/s, lo cual es 13.3 m³/s mayor al Q_{ma} .



Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados para los órdenes Ephemeroptera y Trichoptera indican que el hábitat que éste produce es 1.3 veces mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma creciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 147**). Por otra parte, en el caso del orden Plecoptera, el WUA bajo la condición de $Q_{eco+recarga}$ es 0.8 veces menor al WUA para Q_{ma} , por lo que en este caso, un incremento de caudal sí se traduciría en una ganancia de hábitat ponderado.

Asimismo, se verifica que en la AIA Volcán el caudal ecológico definido en bocatoma más la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición naturalmente conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{7min} es de 2.65 m³/s en la AIA Volcán, mientras que la diferencia entre $Q_{eco+recarga}$ y Q_{ma} es de 5.75 m³/s, lo que indica una situación de caudal ecológico más cercana a los mínimos históricos.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Volcán, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

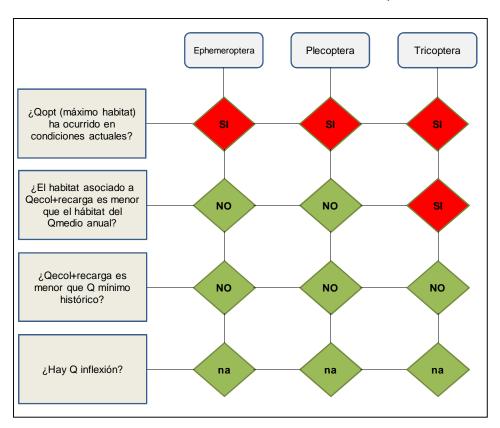


Figura 149.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Volcán. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.8 AIA Colina

Las curvas de hábitat ponderado para macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Colina se presentan en la **Figura 150**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 86**, para cada una de las especies presentes en la AIA Colina. Como fue señalado en los **Acápites** 4.3.8, 4.4.8 **y** 4.5.8, para efectos de la modelación hidráulica no fueron consideradas las secciones P1 y P4A, dado que se verificaron inestabilidades en dicho modelo cuando se incluían estas secciones. Dado que la sección P4A se encuentra en un tramo intermedio de la AIA, la modelación de hábitat fue dividida en dos secciones: un tramo "aguas arriba" y un tramo "aguas abajo", separados por la ubicación de la sección P4A. Para efectos del hábitat ponderado (WUA), se consideró la suma del hábitat en cada uno de los tramos, para un determinado caudal. Un análisis previo indicó que la exclusión de las secciones señaladas para los caudales indicados no incide significativamente en los resultados de hábitat ponderado, tanto en la forma de la curva de hábitat como en la magnitud de los resultados.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera, tal como se muestra en la **Figura 150.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Para caudales mayores a 6 m³/s aproximadamente, se observa un incremento del hábitat ponderado con el aumento de caudal. Esa situación puede visualizarse por la forma de las secciones transversales que conforman la AIA, cuya área mojada aumenta con el incremento del caudal, lo que implica una mayor cantidad de superficie habitable. Esta situación se visualiza en la **Figura 151**, donde se aprecian las diferencias de superficie mojada para el máximo caudal modelado (11.2 m³/s) y el caudal mínimo histórico (0.6 m³/s).



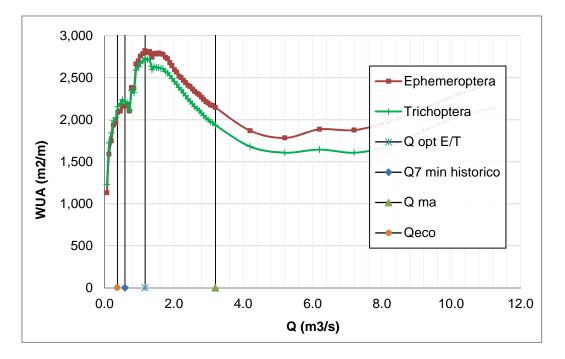


Figura 150.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera y Trichoptera, en AIA Colina. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico. (Fuente: Elaboración propia).

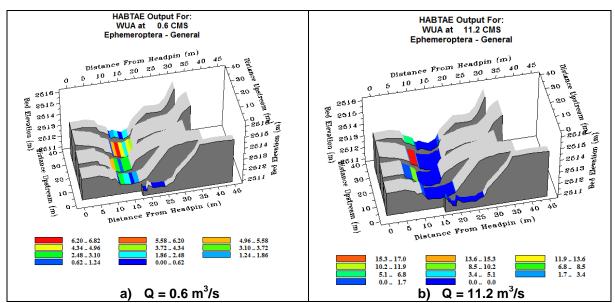


Figura 151.- Resultados Ephemeroptera, AIA Colina, tramo aguas arriba. Se presentan los resultados para el caudal mínimo histórico y el caudal máximo modelado, para efectos de comparar la extensión del hábitat ponderado.

CENTRO DE ECOLOGIA

Tabla 86.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Colina para distintos caudales característicos.

Caudales característicos	WUA (m²/m)			
Caudales caracteristicos	Ephemeroptera	Trichoptera		
Q _{hab opt} *	2,820	2,732		
Q _{7 min} *	2,160	2,211		
Q _{ma} *	2,145	1,934		
Q _{eco} *	2,045	2,112		
Q ₁₅ %**	2,699	2,624		
Q ₅₀ %**	2,385	2,338		
Q ₈₅ %**	2,165	2,189		

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 87**.

Tabla 87.- Caudales característicos en AIA Colina asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 86** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Ephemeroptera	Trichoptera	
Q _{7 min historico} (m ³ /s)	0.59		
Q ma (m ³ /s)	3.2		
Q _{eco} (m ³ /s)	0.37		
Q _{opt} (m ³ /s)	1.17	1.17	

A modo de ejemplo, en la **Figura 152** se presentan los resultados en perfil para el tramo aguas arriba de la AIA Colina, para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), correspondientes al orden Ephemeroptera. En esta figura se puede observar cambio del WUA con el cambio de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.

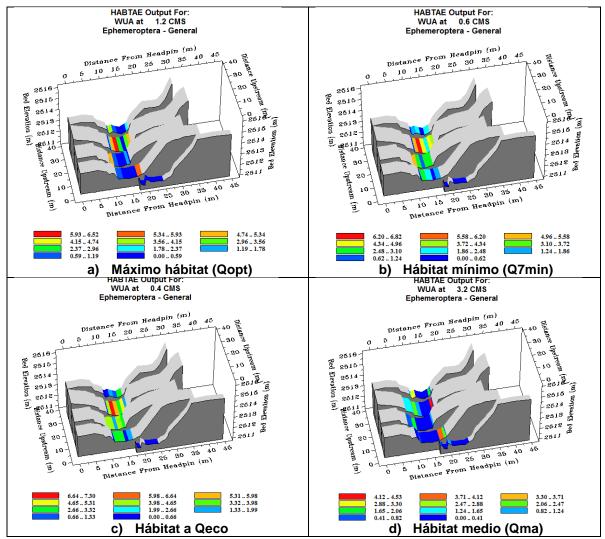


Figura 152.- Resultados Ephemeroptera, AIA Colina, tramo aguas arriba. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Los resultados presentados en la **Figura 153** indican que la condición de hábitat óptimo sí ha ocurrido en un escenario hidrológico actual ($Q_{opt}>Q_{min\ histórico}$). En el caso de Ephemeroptera y Trichoptera, esta condición se ha dado para caudales cercanos al caudal mínimo histórico, siendo la diferencia Q_{opt} - $Q_{min\ histórico}$ igual a 0.58 m³/s, mientras que la diferencia Q_{ma} - Q_{opt} es de 2.03 m³/s.

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados para los órdenes Ephemeroptera y Trichoptera indican que el hábitat que éste produce es



muy similar al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río (ver **Figura 150**). En efecto, para Ephemeroptera el hábitat que se produce bajo el caudal ecológico es 5% menor que el hábitat que produce el caudal medio anual (WUA $_{Qeco}$ < WUA $_{Qma}$). En el caso de Trichoptera esta diferencia es 9% mayor (WUA $_{Qeco}$ > WUA $_{Qma}$).

Asimismo, se verifica que en la AIA Colina el caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**) es menor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición no conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{7min} es de 0.22 m³/s en la AIA Colina (con Q_{eco} < Q_{7min}), mientras que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{ma} es de 2.83 m³/s.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Colina, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

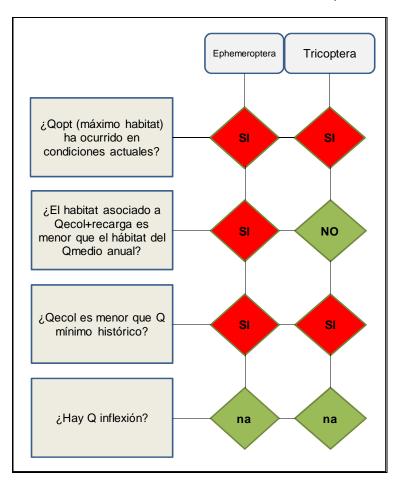


Figura 153.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Colina. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.9 AIA Morado

Las curvas de hábitat ponderado para macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Morado se presentan en la **Figura 154**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 88**, para cada una de las especies presentes en la AIA Morado. Según lo señalado en el **Acápite 4.4.9**, dada la inestabilidad del modelo hidráulico en la sección P1 para caudales menores a 0.22 m³/s, la modelación de hábitat no consideró la sección P1 para caudales menores al señalado, mientras que para caudales mayores fueron consideradas todas las secciones transversales. Un análisis previo indicó que la exclusión de la sección P1 para los caudales señalados no incide significativamente en los resultados de hábitat ponderado, tanto en la forma de la curva de hábitat como en la magnitud de los resultados.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 154.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Para caudales mayores a 3 m³/s aproximadamente y en particular para Ephemeroptera y Trichoptera, se observa un incremento del hábitat ponderado con el aumento de caudal. Esa situación puede visualizarse por la forma de las secciones transversales que conforman la AIA, cuya área mojada aumenta con el incremento del caudal, lo que implica una mayor cantidad de superficie habitable. Esta situación se visualiza en la **Figura 155**, donde se aprecian las diferencias de superficie mojada para el máximo caudal modelado (6.6 m³/s) y el caudal mínimo histórico (0.3 m³/s).



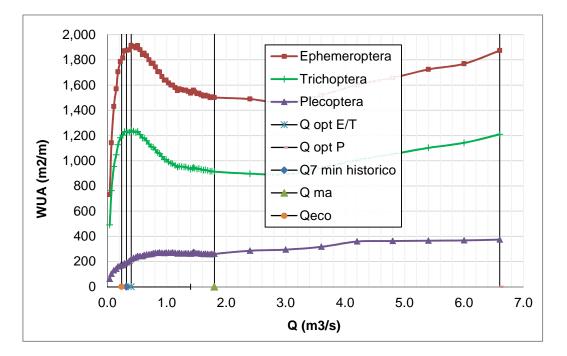


Figura 154.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, en AIA Morado. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico. (Fuente: Elaboración propia).

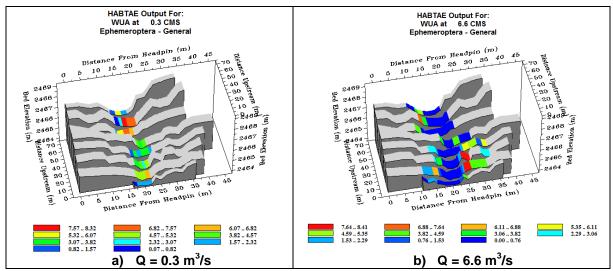


Figura 155.- Resultados Ephemeroptera, AIA Morado. Se presentan los resultados para el caudal mínimo histórico y el caudal máximo modelado, para efectos de comparar la extensión del hábitat ponderado.

CENTRO DE ECOLOGIA

Tabla 88.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Morado para distintos caudales característicos.

Caudales	WUA (m²/m)			
característicos	Ephemeroptera	Plecoptera	Trichoptera	
Q _{hab opt} *	1,914	1,241	374	
Q _{7 min} *	1,873	1,228	191	
Q _{ma} *	1,501	913	261	
Q _{eco} *	1,797	1,189	171	
Q ₁₅ %**	1,828	1,157	255	
Q ₅₀ %**	1,880	1,208	244	
Q ₈₅ %**	1,911	1,238	221	

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 89**.

Tabla 89.- Caudales característicos en AIA Morado asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 88** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Ephemeroptera	Trichoptera	Plecoptera	
Q _{7 min historico} (m³/s)		0.32		
Q _{ma} (m ³ /s)	1.8			
Q _{eco} (m ³ /s)	0.24			
Q _{opt} (m ³ /s)	0.4	0.4	6.6	

A modo de ejemplo, en la **Figura 156** se presentan los resultados en perfil para la AIA Morado, para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), correspondientes al orden Ephemeroptera. En esta figura se puede observar cambio del WUA con el cambio de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.

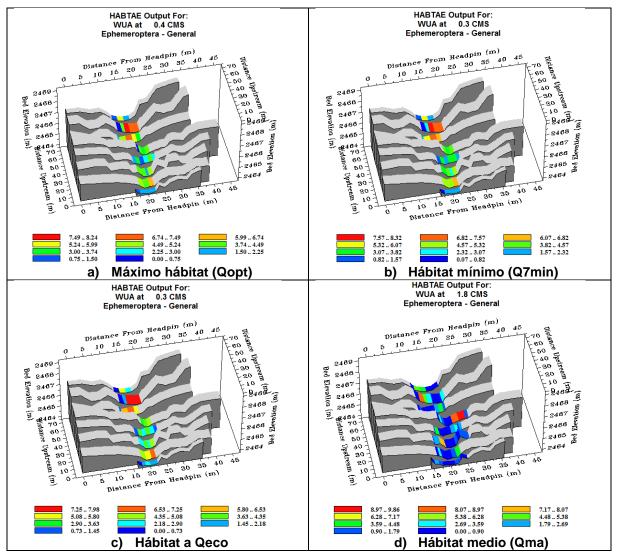


Figura 156.- Resultados Ephemeroptera, AIA Morado. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Los resultados presentados en la **Figura 157** indican que la condición de hábitat óptimo sí ha ocurrido en un escenario hidrológico actual ($Q_{opt} > Q_{min \ histórico}$). En el caso de Ephemeroptera y Trichoptera, esta condición se ha dado para caudales cercanos al caudal mínimo histórico, siendo la diferencia Q_{opt} - $Q_{min \ histórico}$ igual a 0.08 m³/s, mientras que para Plecoptera esta situación ha ocurrido para un caudal más cercano al caudal medio anual, siendo la diferencia Q_{ma} - Q_{opt} de 0.35 m³/s.



Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados para los órdenes Ephemeroptera y Trichoptera indican que el hábitat que éste produce es mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma decreciente de la curva de hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 154**). El WUA bajo la condición de Q_{eco} es en promedio el 1.3 veces mayor que el WUA para Q_{ma} . En el caso de Plecoptera el hábitat que produce el caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**) es un 35% menor que el que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río (ver **Figura 154**), por lo que en este caso un aumento de caudal se traduce en una ganancia de hábitat ponderado.

Asimismo, se verifica que en la AIA Morado el caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**) es menor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición no conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{7min} es de 0.08 m³/s en la AIA Morado (con Q_{eco} < Q_{7min}), mientras que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{ma} es de 1.56 m³/s.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Morado, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

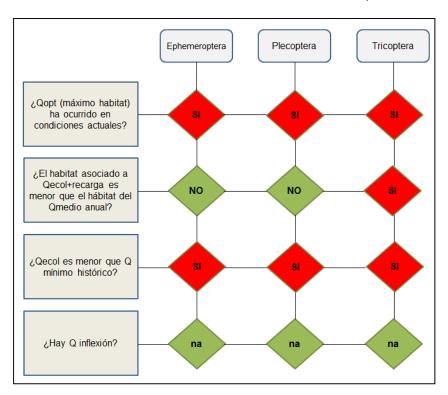


Figura 157.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Morado. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.10 AIA Placas

Las curvas de hábitat ponderado para macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Placas se presentan en la **Figura 158**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 90**, para cada una de las especies presentes en la AIA Placas. Según lo señalado en el **Acápite4.4.10**, dada la inestabilidad del modelo hidráulico en las secciones P2 y P3, la modelación de hábitat no consideró dichas secciones. Un análisis previo indicó que la exclusión de las secciones P2 y P3 para los caudales señalados no incide significativamente en los resultados de hábitat ponderado, tanto en la forma de la curva de hábitat como en la magnitud de los resultados.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y finalmente de Plecóptera, tal como se muestra en la **Figura 158.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la mejor habitabilidad de Ephemeroptera en el sustrato grava (S=0.85), respecto a la de Trichoptera (S=0.6) y Plecoptera (0.8), además de la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas de los órdenes Ephemeroptera y Trichoptera, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Para caudales mayores a 0.4 m³/s aproximadamente, se observa un incremento del hábitat ponderado con el aumento de caudal. Esa situación puede visualizarse por la forma de las secciones transversales que conforman la AIA, cuya área mojada aumenta con el incremento del caudal, lo que implica una mayor cantidad de superficie habitable. Esta situación se visualiza en la **Figura 159**, donde se aprecian las diferencias de superficie mojada para el máximo caudal modelado (1.6 m³/s) y el caudal mínimo histórico (0.1 m³/s). En el caso de Plecoptera, la curva de hábitat es creciente para todo el rango de caudales modelado.



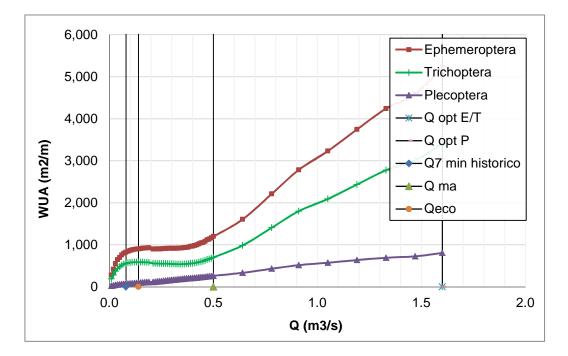


Figura 158.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, en AIA Placas. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico. (Fuente: Elaboración propia).

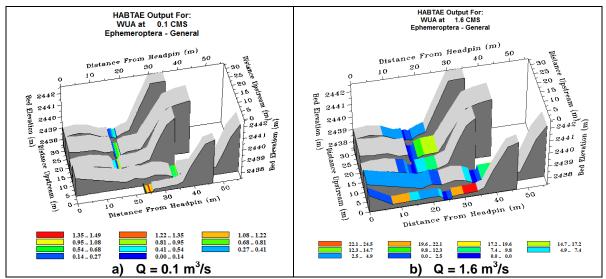


Figura 159.- Resultados Ephemeroptera, AIA Placas. Se presentan los resultados para el caudal mínimo histórico y el caudal máximo modelado, para efectos de comparar la extensión del hábitat ponderado.



Tabla 90.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Placas para distintos caudales característicos.

Caudales		WUA (m²/m)
característicos	Ephemeroptera	Plecoptera	Trichoptera
Q _{hab opt} *	5,224	3,410	806
Q _{7 min} *	819	555	71
Q _{ma} *	1,195	698	260
Q _{eco} *	898	584	95
Q ₁₅ %**	898	585	94
Q ₅₀ %**	884	584	85
Q ₈₅ %**	845	569	76

^{*} Caudales se presentan en **Tabla 91**.

Tabla 91.- Caudales característicos en AIA Placas asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 90** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Ephemeroptera	Trichoptera	Plecoptera
Q _{7 min historico} (m³/s)		0.08	
Q _{ma} (m ³ /s)		0.5	
Q _{eco} (m ³ /s)		0.14	
Q _{opt} (m ³ /s)	1.6	1.6	1.6

A modo de ejemplo, en la **Figura 160** se presentan los resultados en perfil para la AIA Placas, para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), correspondientes al orden Ephemeroptera. En esta figura se puede observar cambio del WUA con el cambio de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.

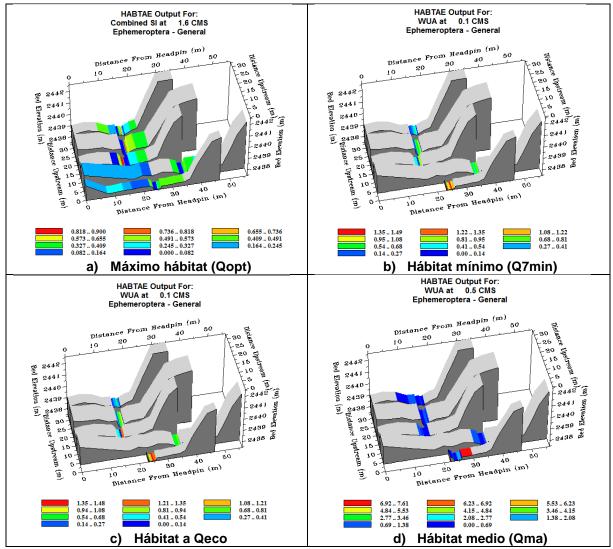


Figura 160.- Resultados Ephemeroptera, AIA Placas. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Para analizar los resultados de WUA en función del caudal desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema, se aplicaron los mismos criterios señalados en la metodología y **Acápite** 4.6.1.

Los resultados presentados en la **Figura 161** indican que la condición de hábitat óptimo sí ha ocurrido en un escenario hidrológico actual (Q_{opt}>Q_{min histórico}). Dado el carácter creciente de las curvas de hábitat ponderado, el máximo WUA se produce al máximo caudal modelado.

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados para indican que el hábitat que éste produce es menor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río, debido a la forma creciente de la curva de



hábitat potencial en ese tramo de caudales (ver **Figura 158**). El WUA bajo la condición de Q_{eco} es 25% menor que el WUA para Q_{ma} para el orden Ephemeroptera. Este porcentaje cambia a 16% para Trichoptera y 63% para Plecoptera.

Asimismo, se verifica que en la AIA Placas el caudal ecológico definido en bocatoma de $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor al caudal mínimo histórico ($Q_{7\text{min}}$ = $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo que no es posible cumplirlo en condiciones de estiaje. Por ende se asume que el caudal pasante en tal condición debe ser el mínimo histórico.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Placas, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

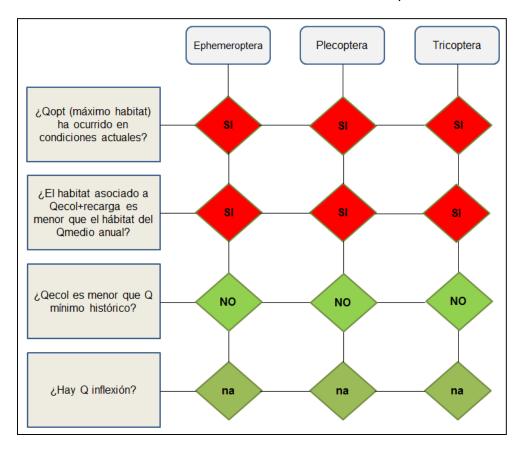


Figura 161.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Placas. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.11 AIA Engorda

Las curvas de hábitat ponderado para macroinvertebrados bentónicos presentes en la AIA Engorda se presentan en la **Figura 162**. Los valores del hábitat ponderado útil (WUA) para distintos caudales característicos se presentan en la **Tabla 92**, para cada una de las especies presentes en la AIA Engorda. Según lo señalado en el **Acápite 4.4.114.5.11**, dada la inestabilidad del modelo hidráulico en la sección P1 para caudales menores a 0.27 m³/s, la modelación de hábitat no consideró la sección P1 para caudales menores al señalado, mientras que para caudales mayores fueron consideradas todas las secciones transversales. Un análisis previo indicó que la exclusión de la sección P1 para los caudales señalados no incide significativamente en los resultados de hábitat ponderado, tanto en la forma de la curva de hábitat como en la magnitud de los resultados.

Respecto a los **macroinvertebrados bentónicos**, los resultados indican que la mejor condición de hábitat se obtiene para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera, tal como se muestra en la **Figura 162.** Esta mejor condición se relaciona con las características hidráulicas de las AIA y con la preferencia sobre las variables profundidad y velocidad de la corriente (ver **Figura 18**). Este resultado es consistente con lo presentado en el estudio de línea de base (CEA, 2013), donde se observó la misma relación de abundancia de estos órdenes a la reflejada por la curva de hábitat.

En cuanto a la forma de las curvas, éstas presentan un primer tramo creciente hasta alcanzar un WUA máximo, para luego tornarse decrecientes hasta alcanzar un WUA estable para caudales altos (en relación a Q_{ma}). Para caudales mayores a 1 m³/s aproximadamente, se observa un incremento del hábitat ponderado con el aumento de caudal. Esa situación puede visualizarse por la forma de las secciones transversales que conforman la AIA, cuya área mojada aumenta con el incremento del caudal, lo que implica una mayor cantidad de superficie habitable. Esta situación se visualiza en la **Figura 163**, donde se aprecian las diferencias de superficie mojada para el máximo caudal modelado $(3.8 \text{ m}^3/\text{s})$ y el caudal mínimo histórico $(0.02 \text{ m}^3/\text{s})$.

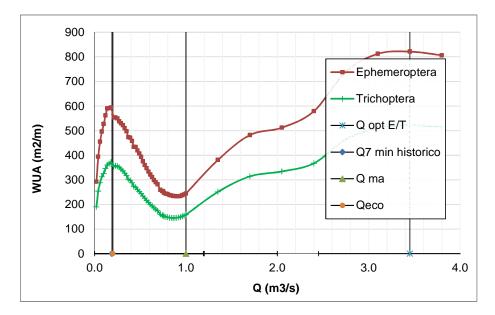


Figura 162.- Hábitat ponderado útil para macroinvertebrados bentónicos orden Ephemeroptera y Trichoptera, en AIA Engorda. Se presentan a modo de referencia los siguientes caudales característicos: Q hábitat óptimo, Q7 mínimo histórico, Q medio anual y Q ecológico. (Fuente: Elaboración propia).

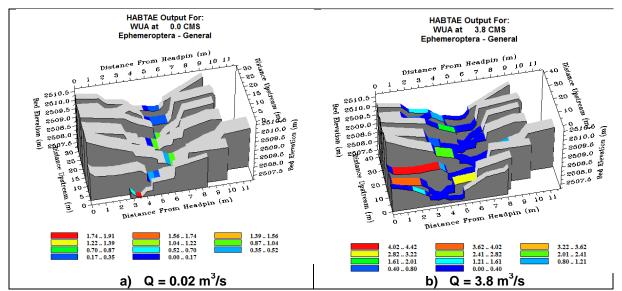


Figura 163.- Resultados Ephemeroptera, AIA Engorda. Se presentan los resultados para el caudal mínimo histórico y el caudal máximo modelado, para efectos de comparar la extensión del hábitat ponderado.

Tabla 92.- Hábitat ponderado útil de fauna íctica y macroinvertebrados en AIA Engorda para distintos caudales característicos.

Caudales característicos	n) AUW	n²/m)
Caudales Calacteristicos	Ephemeroptera	Trichoptera
Q _{hab opt} *	821	522
Q _{7 min} *	580	365
Q _{ma} *	244	158
Q _{eco} *	567	360
Q ₁₅ %**	477	303
Q ₅₀ %**	521	335
Q ₈₅ %**	552	356

^{*} Caudales se presentan en Tabla 93.

Tabla 93.- Caudales característicos en AIA Engorda asociados a los distintos WUA presentados en **Tabla 92** (Fuente: Elaboración propia).

Caudal	Ephemeroptera	Trichoptera					
Q _{7 min historico} (m³/s)	0.19						
Q ma (m ³ /s)	1.0						
Q _{eco} (m ³ /s)	0.2						
Q _{opt} (m ³ /s)	3.45	3.45					

^{**} Caudales se presentan en **Acápite 4.1.** Valor de WUA presentado corresponde al promedio del hábitat calculado para Qmin mens, Q7, Q10, Q330 y Q347 para cada probabilidad de excedencia señalada.



A modo de ejemplo, en la **Figura 164** se presentan los resultados en perfil para la AIA Engorda, para los escenarios de hábitat máximo, mínimo, medio y de caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), correspondientes al orden Ephemeroptera. En esta figura se puede observar cambio del WUA con el cambio de caudal (notar cambio de escala entre figuras), así como la distribución transversal del hábitat dependiendo de las características hidráulicas del río.

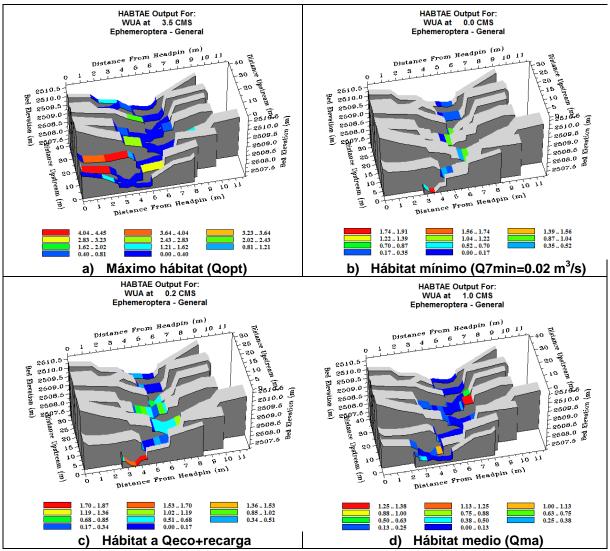


Figura 164.- Resultados Ephemeroptera, AIA Engorda, tramo aguas arriba. Se presentan los resultados para distintas condiciones características, para los caudales modelados más cercanos a la condición señalada. Caudal se indica en encabezado de cada figura en m³/s (CMS).

Para analizar los resultados de WUA en función del caudal desde el punto de vista de una adecuada protección del ecosistema, se aplicaron los mismos criterios señalados en la metodología y **Acápite** 4.6.1.



Los resultados presentados en la **Figura 165** indican que la condición de hábitat óptimo sí ha ocurrido en un escenario hidrológico actual (Q_{opt}>Q_{min histórico}). Dado el carácter creciente de las curvas de hábitat ponderado, el máximo WUA se produce al máximo caudal modelado.

Respecto al caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**), los resultados para los órdenes Ephemeroptera y Trichoptera indican que el hábitat que éste produce es 2.3 veces mayor al que se origina bajo una condición hidrológica media anual del río (ver **Figura 162**), lo que en promedio equivale a 130% para los zoobentos de la AIA Engorda.

Asimismo, se verifica que en la AIA Engorda el caudal ecológico definido en bocatoma (ver **Acápite 3.2.3**) es mayor que el caudal mínimo histórico (Q_{7min}), lo que implica que el río experimentaría una condición conocida en términos hidrológicos. Cabe señalar que la diferencia entre Q_{eco} y Q_{7min} es de solamente 0.01 m³/s en la AIA Engorda, por lo que en la práctica el caudal ecológico equivale al caudal mínimo histórico de este estero.

Respecto al criterio del caudal de inflexión en la curva WUA/Q, se verificó que no es aplicable en la AIA Engorda, dada la forma de las curvas de hábitat potencial.

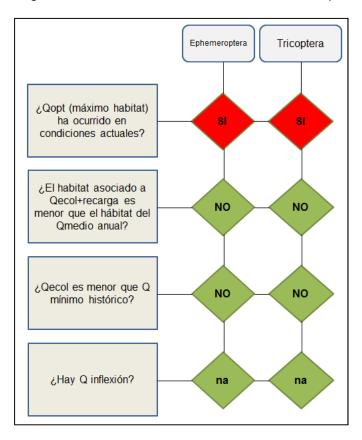


Figura 165.- Diagrama de respuesta a los criterios de evaluación, AIA Engorda. (Fuente: Elaboración propia).



4.6.12 Análisis de la calidad del hábitat

Se realizó un análisis de sensibilidad sobre la calidad del hábitat, limitando el valor del coeficiente de idoneidad ponderado (CF_{min}), que corresponde a la multiplicación de las habitabilidades por velocidad, profundidad y tipo de sustrato. De esta forma, si CF_{min} =0 quiere decir que todas las celdas (independiente de su idoneidad como hábitat), son consideradas en el cálculo de WUA. Por otra parte, si CF_{min} =0.75 quiere decir que para el cálculo del WUA sólo se consideran las celdas cuya idoneidad ponderada es mayor o igual a 0.75.

Los resultados de este análisis indicaron que la calidad del hábitat es baja en el río Maipo, dado que una limitación a CF_{min} =0.5 implicó valores bajos de WUA para las especies en evaluación, con una reducción del hábitat óptimo en un 78% para el caso de AIA Lajas. Por otra parte, al considerar CF_{min} =0.75, el hábitat se hace nulo en esta AIA. La **Figura 166** presenta los resultados de este análisis de sensibilidad para *O. mykiss* en AIA Lajas. El análisis realizado para otras especies y AIA mostró el mismo tipo de resultados.

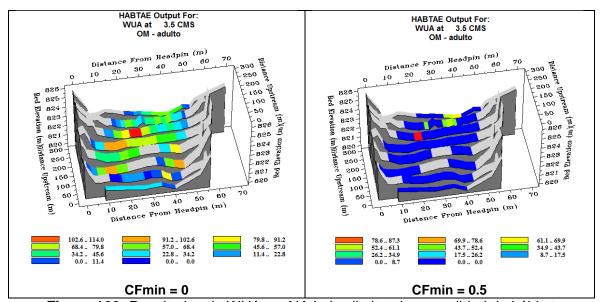


Figura 166.-Resultados de WUA en AIA Lajas limitando por calidad de hábitat.

En el caso de los esteros de alta montaña, se repitió el análisis anterior en la AIA Morado, obteniéndose una baja calidad del hábitat. Una limitación a CF_{min} =0.5 implicó valores bajos de WUA para el orden Ephemeroptera y hábitat nulo para Plecoptera y Trichoptera. En el caso de Ephemeroptera, el hábitat máximo se reduce en un 84% al considerar CF_{min} =0.5. Por otra parte, al considerar CF_{min} =0.75, el hábitat se hace nulo en esta AIA. La **Figura 167** presenta los resultados de este análisis de sensibilidad para Ephemeroptera en AIA Morado.

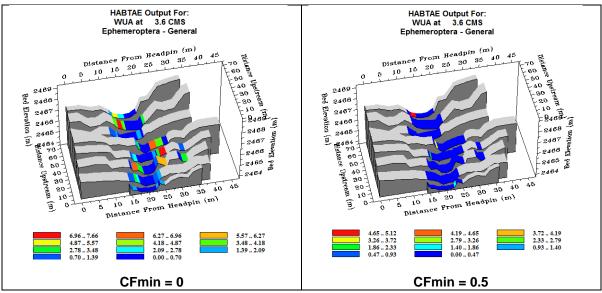


Figura 167.-Resultados de WUA en AIA Morado limitando por calidad de hábitat.



4.7 Modelación hidráulica. Caudal ecológico actividades antrópicas.

En el río Maipo fue identificada la actividad de descenso en Kayak y Rafting (CEA, 2008), como la principal actividad antrópica existente en este.

Dentro de las AIA evaluadas, la actividad es realizada en San Alfonso y el sector del Puente el Toyo (AIA Toyo).

Tal como se señaló en la metodología, fueron considerados los criterios definidos en CEA (2008), a lo que se incorporó el criterio de condiciones mínimas para determinar el caudal requerido para desarrollar tanto el kayak, como el rafting. Los resultados se presentan a continuación, diferenciados por AIA.

4.7.1 AIA Lajas

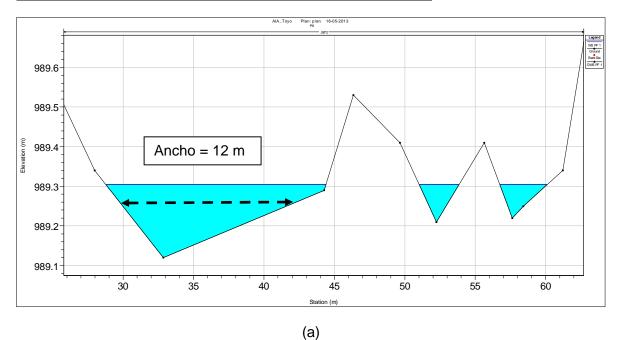
La actividad no es realizada en este tramo.

4.7.2 AIA Toyo

Para el caso de las condiciones medias para practicar descenso, el caudal requerido correspondió a 33 m³/s, ubicándose la sección crítica en el perfil 8 (sección #342.04 en modelo HEC-RAS). En la **Figura 168** se observa el perfil transversal de la sección crítica para diferentes caudales (Q = 0.7 m³/s y Q = 34.293 m³/s), en los que se grafica el cumplimiento de los requerimientos para el rafting para cada uno de estos. En el primer caso (a), se aprecia que para un caudal de 0.7 m³/s se cumple y se sobrepasa el requerimiento del ancho de 12 m. En (b), en tanto, se presenta el caudal para el cual se cumple con la profundidad de 60 cm, para el tramo de 12 metros de ancho. En la **Figura 169** se presentan las mismas condiciones de caudal indicadas anteriormente, extendidas a todo el tramo de AIA evaluado.

El caudal mínimo para el descenso en rafting (ancho de 7.5 metros, con profundidad de al menos 20 cm) fue determinado bajo el mismo procedimiento indicado para el caudal definido para condiciones medias. El tramo crítico para este caso se ubicó entre los perfiles 7 y 8, correspondiendo la sección crítica a la sección interpolada 300.751*, ubicada menos de 7m aguas arriba del perfil 7 y 42 m aguas abajo del perfil 8. Al ser las exigencias en términos de ancho y profundidad considerablemente menores que las del caso anterior, el caudal de rafting reflejó la magnitud de dichas diferencias, correspondiendo a 3.53 m³/s. En la **Figura 170** se representa la sección sujeta a la condición crítica, para un caudal de 0.7 m³/s (para el cual el ancho no cumple con la condición de 7.5 m) y otro para el cual sí se cumple con 7.5 m de ancho y altura de escurrimiento de 20 cm (Q = 4.899 m³/s). Junto con estos, se incluye el caudal de calibración, a modo de referencia.





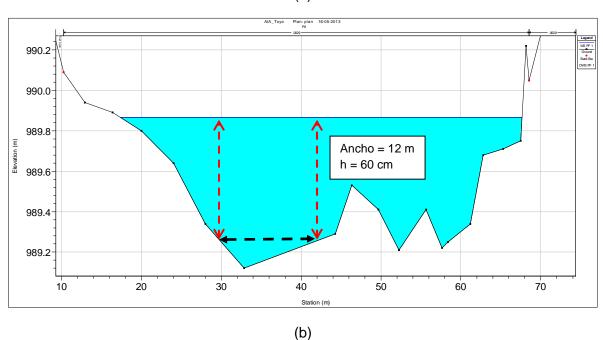


Figura 168.- Determinación de caudal de condiciones medias para rafting en río Maipo, AIA Toyo. (a) $Q = 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q = 34.293 \text{ m}^3/\text{s}$. Flecha de color negro indica condición de ancho igual a 12 m. En (b) flecha de color rojo muestra incremento de 60 cm en altura de escurrimiento en tramo con ancho igual a 12 m. (Fuente: Elaboración propia).



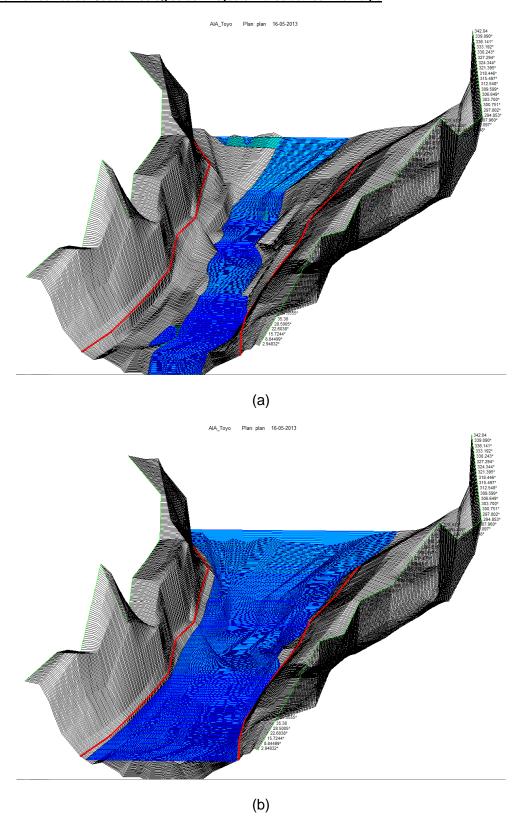


Figura 169.- Captura de imagen Software HEC-RAS en que se presenta escurrimiento en AIA Toyo para caudales (a) $Q = 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ y (b) $Q = 34.293 \text{ m}^3/\text{s}$.



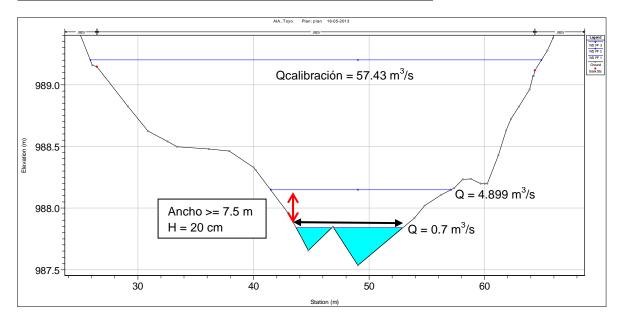


Figura 170.- Determinación de caudal mínimo requerido para rafting en río Maipo en AIA Toyo ($Q = 3.53 \text{ m}^3/\text{s}$). Se indican alturas de escurrimiento para $Q = 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 4.899 \text{ m}^3/\text{s}$, a partir de los cuales se determinó el caudal mínimo y $Q = 57.43 \text{ m}^3/\text{s}$, a modo de referencia.

Considerando que la actividad se desarrolla entre octubre y abril, fueron comparados los resultados obtenidos con los caudales actuales del río para dichos meses (ver **Tabla 15**). Para el caso de evaluación considerado como condiciones "normales" ($Q_{rafting} = 33 \text{ m}^3/\text{s}$), se observa que para años secos (Q_{85}), el río presenta un caudal medio mensual suficiente para sustentar la actividad entre octubre y marzo, mientras en abril el Q_{85} corresponde a 32.7 m $^3/\text{s}$, por lo que solamente harían falta 300 l/s.

En lo que respecta a las condiciones mínimas, la magnitud del caudal es lo suficientemente pequeña cómo para que sea posible realizar rafting en tales condiciones para un año seco en todo el período evaluado (octubre – abril).



4.7.3 AIA San Alfonso

Para el caso de las condiciones medias para practicar descenso, el caudal requerido correspondió a 54 m³/s, ubicándose la sección crítica en un tramo intermedio entre los perfiles 7 y 6, unos 23 metros aguas arriba de este último (sección interpolada # 100.505*). En la **Figura 171** se observa el perfil transversal de la sección crítica para diferentes caudales, en los que se grafica el cumplimiento de los requerimientos para el rafting para cada uno de estos. En el primer caso (a) se observa que el escurrimiento se concentra en el lado derecho del cauce para un caudal menor. En (b) se observa que para un caudal levemente superior se produce el cumplimiento en la condición de ancho mínimo en el sector izquierdo de la sección transversal, una vez superado el punto alto señalado. Finalmente, en (c) se observa que el caudal indicado cumple con el requerimiento de un tramo de 12 metros de ancho, con a lo menos 60 cm de profundidad.

Cabe señalar que para el análisis se consideró la condición de continuidad de la actividad en cada perfil, verificándose que con el caudal indicado se cumple con esta. Al respecto, en algunos tramos para caudales bajos, el flujo se separa en dos cauces (izquierdo y derecho), por donde escurre el agua, tal como se aprecia en la **Figura 171b** y, con más claridad, en la **Figura 172**. Para cumplir con los requerimientos del rafting/kayak por el sector derecho, se requiere de 62.4 m3/s, siendo el perfil interpolado #92.3069* el crítico (ver **Figura 172**). No obstante, en este mismo perfil, el caudal requerido para poder desarrollar el rafting/kayak por el lado izquierdo del cauce es de 48.2 m³/s.

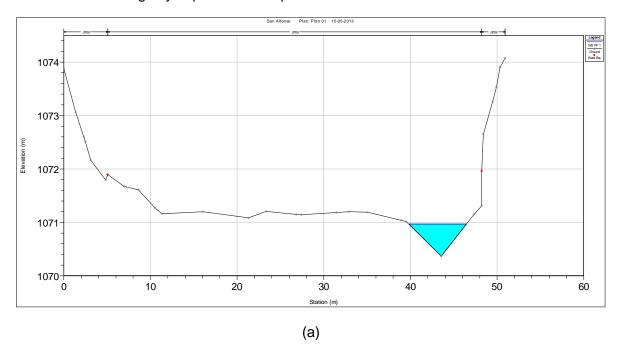
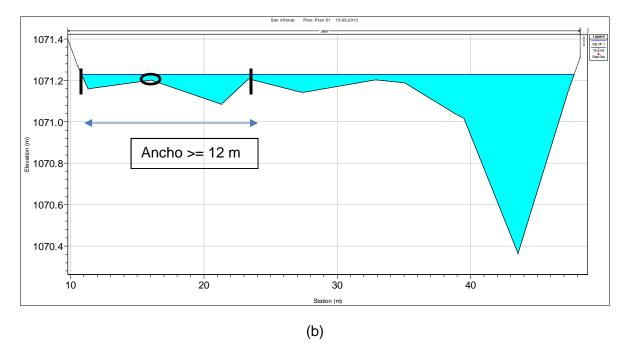


Figura 171.- Determinación de caudal de condiciones medias para rafting en río Maipo, sector San Alfonso. (a) $Q = 2.164 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q = 3.246 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q = 54 \text{ m}^3/\text{s}$. En (b) se identifica con circunferencia punto alto que debe ser superado para que pelo de agua tenga una extensión de a lo menos 12 metros.





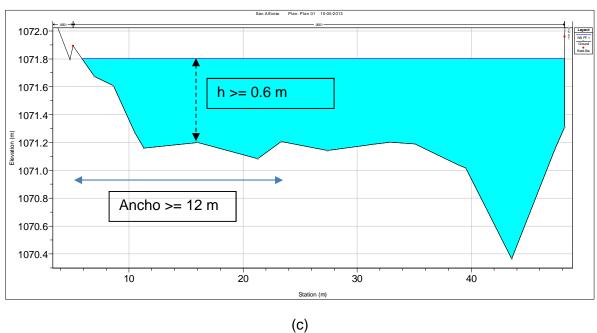


Figura 171 (continuación).- Determinación de caudal de condiciones medias para rafting en río Maipo, sector San Alfonso. (a) $Q = 2.164 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q = 3.246 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q = 54 \text{ m}^3/\text{s}$. En (b) se identifica con circunferencia punto alto que debe ser superado para que pelo de agua tenga una extensión de a lo menos 12 metros.



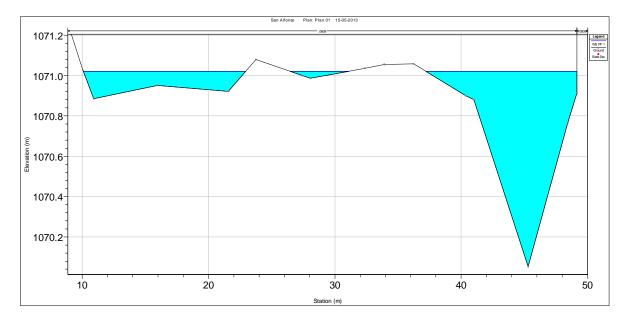


Figura 172.- Ejemplo caudal requerido para rafting en perfil interpolado #92.3069*. Para Q = 3.246 m³/s, condición de 12 metros de ancho no se cumple en cauce ubicado por lado derecho (se requiere un caudal mayor), pero sí por el izquierdo.

En la **Figura 173** se presenta el tramo de río en torno al perfil crítico, que da muestra de la continuidad señalada, aunque en la figura solamente es representada para un tramo acotado.

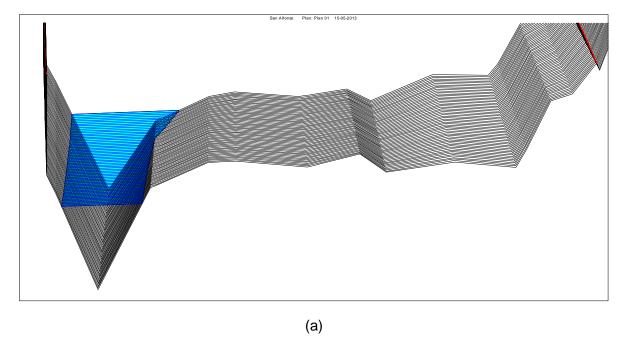


Figura 173.- Condición de cauce del río Maipo en torno a perfil crítico para rafting/kayak (tramo de unos 10 metros de extensión). (a) $Q = 2.164 \text{ m}^3/\text{s}$. (b) $Q = 3.246 \text{ m}^3/\text{s}$ (vista desde aguas abajo).



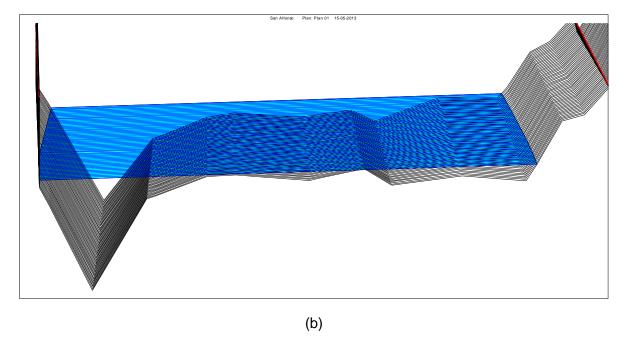


Figura 173 (continuación).- Condición de cauce del río Maipo en torno a perfil crítico para rafting/kayak (tramo de unos 10 metros de extensión). (a) $Q = 2.164 \text{ m}^3/\text{s}$. (b) $Q = 3.246 \text{ m}^3/\text{s}$ (vista desde aguas abajo).

Respecto a los perfiles medidos, el de mayor requerimiento de caudal para cumplir con las condiciones definidas para el rafting correspondió al perfil 7, correspondiendo dicho caudal a 29 m³/s.

El caudal mínimo para el descenso en rafting (ancho de 7.5 metros, con profundidad de al menos 20 cm) fue determinado bajo el mismo procedimiento indicado para el caudal definido para condiciones medias. El tramo crítico para este caso se ubicó en las cercanías del perfil 6, correspondiendo la sección crítica a la sección interpolada 81.7090*, ubicada menos de 5m aguas arriba del perfil 6. Al ser las exigencias en términos de ancho y profundidad considerablemente menores que las del caso anterior, el caudal de rafting reflejó la magnitud de dichas diferencias, correspondiendo a 6.74 m³/s. En la **Figura 174** se representa el tramo sujeto a la condición crítica, para un caudal en el que el ancho de la superficie libre es menor a 7.5 m (Q = 1.082 m³/s) y otro para el cual se cumple con la condición de ancho de 7.5 m y altura de escurrimiento de 20 cm (Q = 7.574 m³/s).

Respecto a los perfiles medidos, el de mayor requerimiento de caudal para cumplir con las condiciones definidas para el rafting correspondió al perfil 6, siendo dicho caudal igual a 5.85 m³/s.



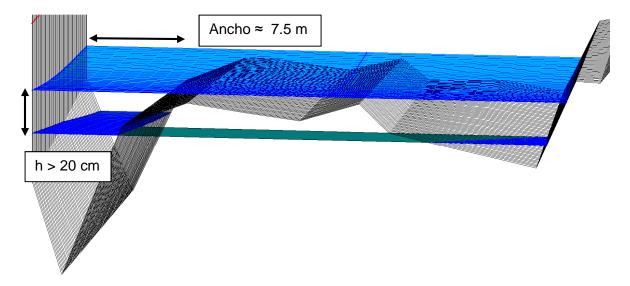


Figura 174.- Captura de imagen de Software HEC-RAS en que se presenta altura de escurrimiento en tramo de 15 metros en torno a perfil crítico, para (a) $Q = 1.064 \text{ m}^3/\text{s}$ y (b) $Q = 7.574 \text{ m}^3/\text{s}$. Notar que ancho de escurrimiento es levemente inferior a 7.5 m en (a) (vista desde aguas abajo).

Considerando que la actividad se desarrolla entre octubre y abril, fueron comparados los resultados obtenidos con los caudales actuales del río para dichos meses (ver **Tabla 17**). Para el caso de evaluación considerado como condiciones "normales" (Q_{rafting} = 54 m³/s), se observa que para años secos, el río presenta un caudal medio mensual suficiente para sustentar la actividad entre noviembre y febrero, mientras que para marzo y octubre, el caudal medio mensual de un año normal permitiría desarrollar el descenso en rafting. En lo que respecta a abril, el caudal medio de un año normal sería insuficiente (se requerirían en torno a 9 m³/s más escurriendo por el río Maipo), pero para un año húmedo el caudal sí permitiría realizar el rafting para las condiciones evaluadas.

En lo que respecta a las condiciones mínimas, la magnitud del caudal es lo suficientemente pequeña cómo par que sea posible realizar rafting en tales condiciones para un año seco en todo el período evaluado (octubre – abril).



4.8 Comparación entre situación sin y con proyecto

Se evaluó la variación respecto de la situación actual de las diferentes AIA en términos del caudal, altura de escurrimiento y habitabilidad, por efecto de la operación del proyecto. Para la evaluación fue considerada la condición de estiaje.

4.8.1 Efectos sobre los caudales

La variación de caudales para las situaciones sin y con proyecto se realizó de dos formas, una fue mediante un análisis gráfico de series de tiempo para años medios y secos, y otra mediante un análisis cuantitativo de caudales para la condición de estiaje.

Series de tiempo comparativas para años medios y secos

Para efectuar una comparación de la situación sin y con proyecto, se consideraron las series hidrológicas del ANEXO III.1 APR Ingeniería S/Aa. A IX Caracterización régimen caudales medios diarios. El escenario con proyecto en el sector de los esteros de la zona alta del Volcán, se generó considerando la entrada en operación de las bocatomas, lo cual está sujeto a restricciones, como por ejemplo, que el máximo caudal captado no puede exceder el caudal conforme a los derechos de aguas constituidos. El mínimo caudal pasante corresponde al denominado caudal ecológico, este caudal tiene un mismo valor a lo largo del año: Estero Morado (0,24 m3/s), Estero Las Placas (0,14 m3/s), Estero Colina (0,37 m3/s) y Estero La Engorda (0,20 m3/s). Para la situación con proyecto en el río Yeso, se consideró que la extracción máxima de la bocatoma Yeso de 15 m³/s, con la restricción de un caudal ecológico de 0,82 m³/s. Para obtener la situación con proyecto en el río Colorado, no se consideraron los caudales de las descargas de las centrales Alfalfal y Maitenes, ya que la operación considera que el aporte de éstos no se evacúa al río Colorado.

A partir de las series hidrológicas del **ANEXO III.3 Series Hidrológicas QMDiarios PHAM**, se construyeron los estadígrafos de caudales medios anuales (año hidrológico de julio a junio) y caudales medios mensuales. Los primeros se utilizaron para estimar qué tipo de año hidrológico representó la temporada, tomando como probabilidad de excedencia anual P50% para un año medio y P85% para un año seco. Los segundos se utilizaron para construir gráficos de series de tiempo mensuales para ambos años (medio y seco), en situación sin y con proyecto.

En la Tabla 94 se presentan las series hidrológicas por AIA, y los años que representan los años hidrológicos medios y secos.



Tabla 94. Series hidrológicas sin y con proyecto utilizadas por AIA.

N°	Sección AIA	Serie Hidrológica Sin y Con Proyecto (más cercana a AIA)	Año medio (P 50%)	Año seco (P 85%)
1	AIA Colina-01	Colina BT PHAM	2008-2009	1976-1977
2	AIA MOR-01	El Morado BT PHAM	2008-2009	1976-1977
3	AIA ENG-01	La Engorda BT PHAM	1986-1987	1971-1972
4	AIA Placas-01	Las Placas BT PHAM	2008-2009	1976-1977
5	AIA PBN-18 / Volcán en Queltehues	Volcán a. arriba Maipo	2008-2009	2004-2005
6	AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso	Maipo a. abajo Yeso	1994-1995	1975-1976
7	AIA Toyo	Maipo a. arriba Colorado	1974-1975	1975-1976
8	AIA Lajas / Maipo en el Manzano	Maipo a. abajo Colorado	1989-1990	1975-1976
9	AIA COL-2 / Bocatoma Colorado	Colorado a. abajo D. Alfalfal	2003-2004	1998-1999
10	AIA PBN-20	Colorado a. arriba Maipo	1985-1986	1998-1999
11	AIA PBN-15	Yeso a. arriba Maipo	2006-2007	1968-1969

La Figura 175 a la **Figura 185** muestran las comparaciones de caudales sin y con proyecto para las 11 AIA en condiciones de año medio P50% y seco P85%, en base a caudales medios mensuales.

Las series de tiempo muestran que la mayor disminución relativa de caudales se produce en los esteros del sector alto del Volcán (Colina, Morado, Engorda y Placas) y río Colorado en Alfalfal, en que la situación con proyecto capta una fracción importante de los caudales de deshielo. Para el estiaje la diferencia relativa entre la condición sin y con proyecto se reduce debido a la menor disponibilidad de caudales, y su proximidad al caudal ecológico pasante en bocatoma.

El efecto de la operación del proyecto se va reduciendo progresivamente hacia aguas abajo, debido al ingreso de caudales de recarga de tramos intermedios. Es así que en tres sectores del río Maipo analizados, la series de tiempo de caudales sin y con proyecto son más similares.

Los casos de río Colorado bajo Maitenes (AIA PBN20), Volcán en Queltehues y el río Yeso, muestran una condición intermedia a los descritos anteriormente, ya que aunque muestran un efecto de la operación del proyecto, el caudal permitiría emular una señal de crecida hidrológica de deshielo.

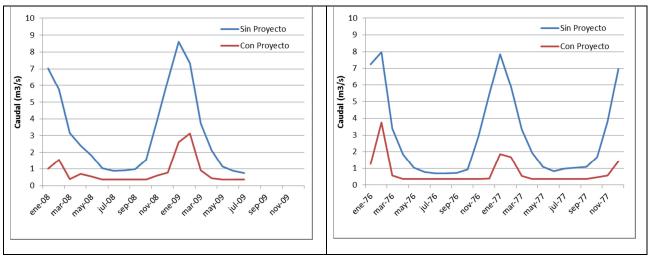


Figura 175. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA Colina-01 (serie hidrológica Colina BT PHAM)

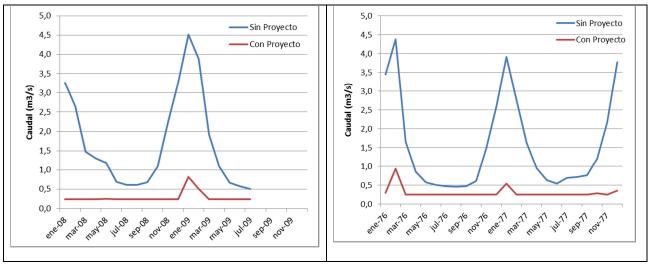


Figura 176. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA MOR-01 (serie hidrológica El Morado BT PHAM)

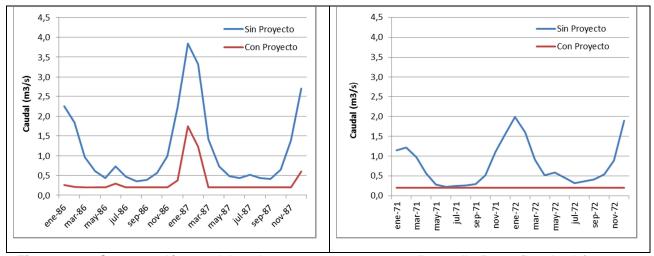


Figura 177. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA ENG-01 (serie hidrológica La Engorda BT PHAM)

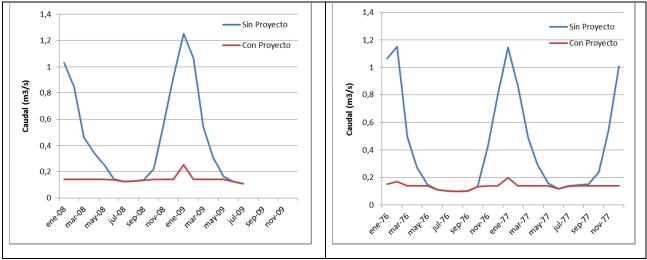


Figura 178. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA Placas-01 (serie hidrológica Las Placas BT PHAM)



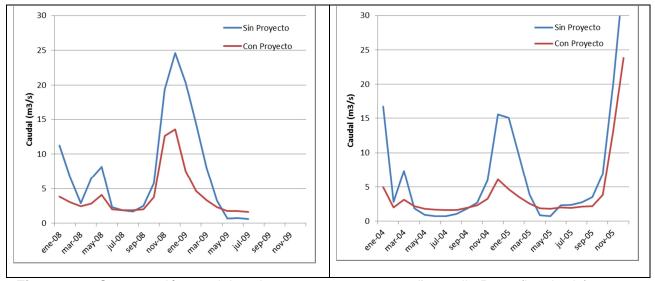


Figura 179. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA PBN-18 / Volcán en Queltehues (serie hidrológica Volcán a. arriba Maipo)

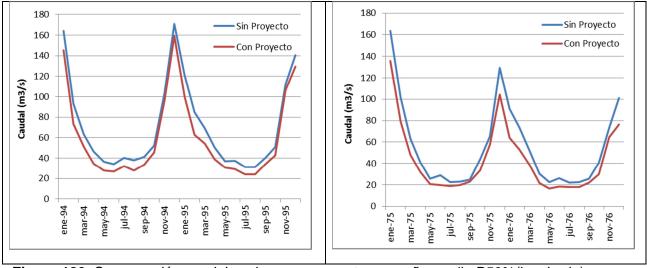


Figura 180. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA San Alfonso / Maipo en San Alfonso (serie hidrológica Maipo a. abajo Yeso)

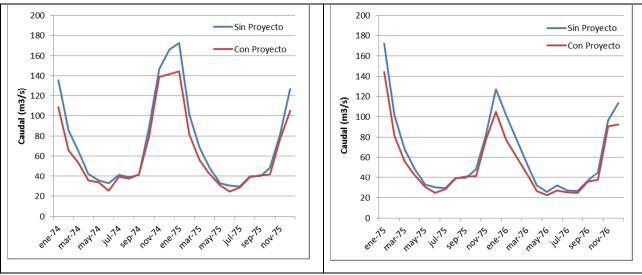


Figura 181 Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA Toyo (serie hidrológica Maipo a. arriba Colorado)

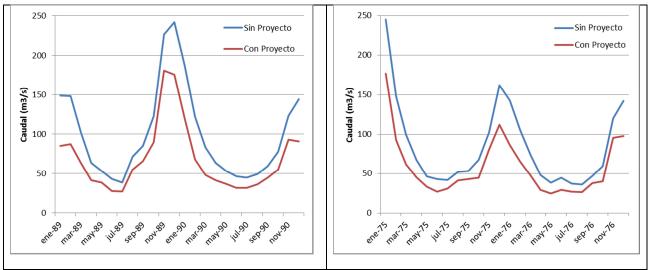


Figura 182. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA Lajas / Maipo en el Manzano (serie hidrológica Maipo a. abajo Colorado)

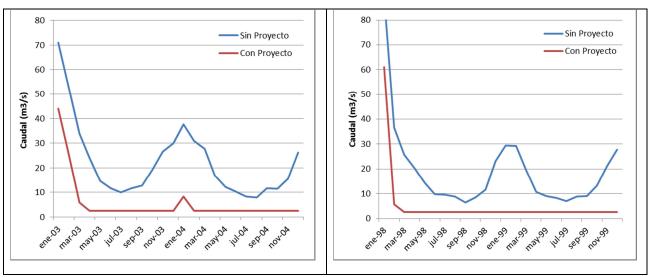


Figura 183. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA COL-2 / Bocatoma Colorado (serie hidrológica Colorado a. abajo D. Alfalfal)

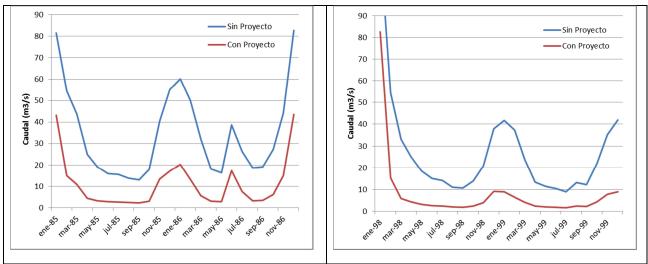


Figura 184. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA PBN-20 (serie hidrológica Colorado a. arriba Maipo)

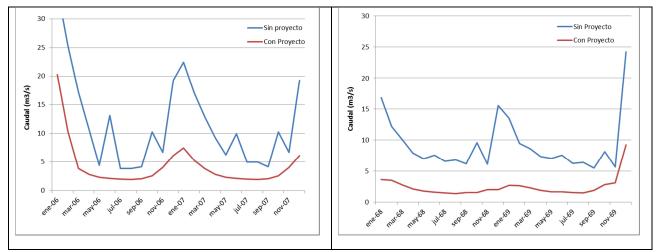


Figura 185. Comparación caudales sin y con proyecto para año medio P50%(izquierda) y seco P85% (derecha) en AIA PBN-15 (serie hidrológica Yeso a. arriba Maipo)

Comparación de caudales para la condición de estiaje

Para cuantificar la variación de caudales se realizó un análisis comparativo de los caudales de la situación sin y con proyecto en estiaje, que representaría la condición de menor disponibilidad de aqua que ocurre durante invierno.

El caudal sin proyecto en cada AIA se calculó como la suma de los caudales actuales que pasan por cada una de los puntos donde hay bocatomas proyectadas (Q sobre bocatoma), más las recargas intermedias que son aportadas por todos los tramos entre las bocatomas y AIA. Ambas fueron estimadas en estiaje como el menor caudal de la curva de variación estacional de P85%. En particular la recargas intermedias corresponden a los caudales señalados en el ANEXO III.1 APR Ingeniería 2013b Determinación de caudales de recargas intermedias RevC.

El caudal con proyecto se estimó al reemplazar los caudales de estiaje sobre las bocatomas, por los caudales ecológicos requeridos por la autoridad DGA. Con ello, se simula que las AIA recibirán el agua asociada a caudal ecológico de todas las bocatomas más las recargas intermedias de estiaje.

En la Tabla 95 se indican los valores de los caudales sin y con proyecto, además de la diferencia, proporción y porcentaje de cambio atribuible al proyecto.

La mayor reducción en estiaje la experimentaría el río Colorado en sus dos AIA (-54% y -65%). También Maipo en Las Lajas tendría una disminución importante (-28%), como consecuencia de la operación en el río Colorado. Las secciones del Maipo en el Toyo y San Alfonso tendrían una reducción menor en estiaje (-6%).



Tanto para el río Yeso y el Volcán, la reducción en estiaje sería moderada (-18% y -14%, respectivamente).

En el caso de los esteros del sector alto del Volcán, tanto Colina como Morado reducirían su caudal entorno a la mitad (-46% y -47%, respectivamente), y Engorda una magnitud moderada (-20%). En el caso de las Placas se consideró para este análisis que el requerimiento de caudal ecológico igualaría al caudal disponible en estiaje, por ello su nula variación.

Tabla 95. Comparación de variación de caudal sin y con proyecto en condiciones de estiaje.

	CAUDAL SIN PROYECTO (m3/s)	CAUDAL CON PROYECTO (m3/s)	DIFERENCIA CAUDAL	PROPORCIÓN CAUDAL	CAMBIO CAUDAL
AIA	Q sobre bocatoma + Recargas P85%	Qeco + Recargas P85%	Qeco Con Proyecto - Q Sin proyecto	Qeco Con Proyecto / Q Sin proyecto (%)	Qeco Con Proyecto /Q Sin proyecto - 100 (%)
Maipo Lajas	37,56	26,92	-10,64	72%	-28%
Maipo El Toyo	19,93	18,81	-1,12	94%	-6%
Maipo San Alfonso	19,65	18,53	-1,12	94%	-6%
Colorado-Alfalfal	7,27	2,51	-4,76	35%	-65%
Colorado-Maitenes	8,77	4,01	-4,76	46%	-54%
Yeso	1,61	1,32	-0,29	82%	-18%
Volcán	3,79	3,25	-0,54	86%	-14%
Colina	0,69	0,37	-0,32	54%	-46%
Morado	0,45	0,24	-0,21	53%	-47%
Placas	0,10	0,10	0,00	100%	0%
Engorda	0,25	0,20	-0,05	80%	-20%

4.8.2 Efectos sobre la cota de agua

Fue medida la variación de la altura de escurrimiento en cada AIA para una situación con y sin proyecto en período de estiaje. Para la evaluación de las alturas, fueron utilizados los resultados presentados en el **Anexo IV.3**. En la **Tabla 96** se presentan los resultados. En esta se indican la variación promedio (en términos absolutos y porcentuales) y la variación máxima de un perfil, para cada AIA.

Las mayores variaciones se darían en cuerpos de agua afectados directamente por el proyecto (es decir, ríos o esteros que consideran la instalación de bocatomas). Entre estos están las AIA Alfalfal y Maitenes en el río Colorado (variación media de la altura de escurrimiento de 29% y 24%, respectivamente), y las AIA Colina (21%) y Morado (23%).



Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

Además, en el AIA Engorda la variación media sería un tanto menor a la de las AIA mencionadas (11%), pero la sección con la máxima variación presentaría un descenso de la altura de escurrimiento equivalente a un 28%.

Así como las mayores variaciones están en cuerpos de agua con bocatoma, los menos afectados correspondería a los ríos/esteros cuyos afluentes consideran la instalación de bocatomas, es decir el río Volcán (3%) y el río Maipo (2% y 4% en las AIA Toyo y San Alfonso, respectivamente). Cabe destacar que las AIA Lajas y Yeso correspondieron a las excepciones a lo señalado anteriormente (el río Yeso, pese a la bocatoma proyectada, vería un descenso de solamente un 3% en su altura media).

Finalmente, el estero las Placas no vería modificado su caudal para una condición de estiaje, ya que este sería menor al caudal ecológico.

Tabla 96.- Variación de altura de escurrimiento para situación con y sin proyecto en período de estiaje.

AIA	sobre bo	actual (Q catoma + is P85%)		con proyecto cargas P85%)	Variación					
	Q h medio (m³/s) (m)		Q (m ³ /s)	h medio (m)	Δh medio (m)	∆h medio (%)	Δh máx. (m)	∆h máx. (%)		
Lajas	37.56	0.94	26.92	0.85	-0.09	-10%	-0.1	-11%		
Toyo	19.93	1.01	18.81	0.97	-0.04	-4%	-0.05	-5%		
San Alfonso	19.65	1.23	18.53	1.20	-0.03	-2%	-0.03	-3%		
Alfalfal	7.27	0.79	2.51	0.56	-0.23	-29%	-0.29	-34%		
Maitenes	8.77	0.72	4.01	0.55	-0.17	-24%	-0.21	-26%		
Yeso	1.61	0.42	1.32	0.41	-0.01	-3%	-0.02	-4%		
Volcán	3.79	0.64	3.25	0.62	-0.02	-3%	-0.03	-5%		
Colina	0.69	0.34	0.37	0.27	-0.07	-21%	-0.08	-24%		
Morado	0.45	0.26	0.24	0.20	-0.06	-23%	-0.08	-25%		
Placas	0.1	0.16	0.1	0.16	0.00	0%	0	0%		
Engorda	0.25	0.35	0.2	0.31	-0.04	-11%	-0.08	-28%		



4.8.3 Efectos sobre el hábitat

En base a los caudales determinados en el **Acápite 4.8.1** para las condiciones sin proyecto y con proyecto, se calculó el hábitat ponderado para cada uno de estos casos, determinándose la diferencia de hábitat, la proporción de hábitat y el porcentaje de cambio de hábitat para cada una de las AIA y especies en evaluación.

En la **Tabla 97** y **Tabla 98** se muestran las cantidades de hábitat calculados para las condiciones de estiaje sin y con proyecto, respectivamente. La **Tabla 99** muestra las diferencias de hábitat sin y con proyecto, estimados como la resta del hábitat WUA en ambas situaciones (WUA Con Proyecto - WUA Sin proyecto), en tanto que la **Tabla 99** muestra la proporción como valor porcentual, estimada como el cociente de las condiciones (WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto).

Los resultados de la **Tabla 101** muestran el porcentaje de cambio de hábitat ponderado útil para una condición con proyecto en relación a una sin proyecto (WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto – 100%). Estos indican que, considerando una condición de estiaje, en las AIA Colorado en Alfalfal, Colorado en Maitenes, Volcán y Engorda, la implementación del proyecto implica una mayor cantidad de hábitat ponderado disponible respecto a la situación sin proyecto. Esto se explica por la "forma de campana" de las curvas de hábitat, donde el máximo ocurre para caudales cercanos a los mínimos históricos. De esta forma, una disminución del caudal pasante por la AIA (desplazamiento de derecha a izquierda en la curva), se traduce en un aumento de hábitat. Estas ganancias de hábitat son poco significativas para las AIA Engorda y Volcán (entre +1% y +5%), y de mayor cuantía para las AIA Alfalfal (+26%) y Maitenes (+92% a +224%).

En cuanto a la AIA Placas, dado que el caudal ecológico definido en bocatoma es de 0.14 m³/s, y que el caudal mínimo en estiaje es de 0.1 m³/s, se define como caudal pasante el disponible en el río (0.1 m³/s). Por esta razón, las situaciones con proyecto y sin proyecto no se traducen en un cambio de hábitat en la AIA.

En el caso de las AIA Colina y Morado, la implementación del proyecto se traduce en una pérdida de hábitat para todas las especies en evaluación, en su mayoría en torno al -5%, a excepción del orden Plecoptera en la AIA Morado, donde la disminución de hábitat ponderado es de -26%.

En el caso de las AIA Lajas, Toyo, San Alfonso y Yeso, la implementación del proyecto significa una ganancia de hábitat para la mayoría de las especies evaluadas en cada AIA, y una pérdida de hábitat para otras. En el caso de la AIA Lajas, se produce pérdida de hábitat para 1 de 9 especies/estadios evaluados. Para la AIA Toyo se produce pérdida de hábitat para 2 de 7 especies/estadios evaluados. En la AIA San Alfonso se produce pérdida de hábitat para 1 de 5 especies/estadios evaluados. Para la AIA Yeso se produce pérdida de hábitat para 5 de 5 especies/estadios evaluados.



Respecto a las especies y estadios evaluados, para la **trucha café (salmo trutta)** se observa que la condición con proyecto implica una disminución del hábitat ponderado en 1 de 3 AIA donde se registró la especie.

Se observa que en la AIA Lajas se produce el mayor incremento en la cantidad de hábitat ponderado, tanto para los estadios adulto (+18%) como juvenil (+31%), mientras que en la AIA San Alfonso es donde se produce una disminución de hábitat para los estadios adulto (-1%) y juvenil (-5%).

Para la **trucha arco**íris (*Oncorhynchus mykiss*) se observa que la condición con proyecto implica una disminución del hábitat ponderado en 1 de 3 AIA donde se registró la especie. La mayor ganancia de hábitat se registra en la AIA Maitenes, con un incremento de +217% de WUA para el estadio adulto y +92% para el estadio juvenil.

Respecto al bagre (*Trichomycterus areolatus*), se observa que la condición con proyecto implica una disminución del hábitat ponderado en 2 de 3 AIA donde se registró la especie. Esta disminución del hábitat es de -26% para el estadio juvenil en la AIA Lajas y -1% en la AIA El Toyo.

En cuanto a los **macroinvertebrados bentónicos**, se observa que la condición con proyecto implica una disminución del hábitat ponderado en 4 de 11 AIA donde se registraron los órdenes evaluados. Si bien en la mayoría de las AIA se produce ganancia de hábitat para algún orden y pérdida para otro, en las AIA Colina y Morado el hábitat ponderado disminuye para todos los órdenes evaluados.

Tabla 97 Hábitat WUA Sin Proyecto (m2/m)

		CAUDAL (m3/s)	ALTURA (m)	HABITAT	HABITAT WUA Sin Proyecto (m2/m)								
		Q sobre bocatoma											
N°	AIA	Recargas P85%	h medio	St adulto	St juvenil	OM adulto	OM juvenil	TA adulto	TA juvenil	E	т	Р	
1	Lajas	37,56	0,94	1096	1782	1340	169	506	197	2447	1494	618	
2	El Toyo	19,93	1,01			1471	153	409	147	2325	745	1459	
3	San Alfonso	19,65	1,23	2666	5546					7365	3415	4425	
4	Colorado-Alfalfal	7,27	0,79							2967			
5	Colorado- Maitenes	8,77	0,72			847	108	377	106		1047	400	
6	Yeso	1,61	0,42	778	1498					2651	1590	557	
7	Volcán	3,79	0,64							2388	1385	696	
8	Colina	0,69	0,34							2136	2150		
9	Morado	0,45	0,26							1902	1231	230	
10	Placas	0,10	0,16							861	576	79	
11	Engorda	0,25	0,35							549	355		



Tabla 98 Hábitat WUA Con Proyecto (m2/m)

		CAUDAL (m3/s)	ALTURA (m)	HABITAT	HABITAT WUA Con Proyecto (m2/m)								
N°	AIA	Qeco + Recargas P85%	h medio	St adulto	St OM OM TA TA St adulto juvenil adulto juvenil E T F								
1	Lajas	26,92	0,85	1294	2330	1586	183	733	146	3029	1909	766	
2	El Toyo	18,81	0,97			1406	155	404	150	2379	789	1531	
3	San Alfonso	18,53	1,20	2740	5792					7559	3344	4543	
4	Colorado-Alfalfal	2,51	0,56							3734			
5	Colorado- Maitenes	4,01	0,55			2681	206	729	195		2634	1296	
6	Yeso	1,32	0,41	771	1416					2784	1687	544	
7	Volcán	3,25	0,62							2496	1451	719	
8	Colina	0,37	0,27							2045	2112		
9	Morado	0,24	0,20							1800	1192	170	
10	Placas	0,10	0,16							861	576	79	
11	Engorda	0,20	0,31							567	360		

Tabla 99 Diferencia de Hábitat WUA Con Proyecto - WUA Sin proyecto (m2/m)

		DIFERENCI A CAUDAL (m3/s)	DIFEREN CIA ALTURA (m)	DIFEREN (m2/m)	DIFERENCIA HABITAT WUA Con Proyecto - WUA Sin proyecto (m2/m)								
N°	AIA	Q	h medio	St adulto	St juvenil	OM adulto	OM juve nil	TA adulto	TA juveni I	E	т	Р	
1	Lajas	-10,64	-0,09	197	548	245	14	227	-51	582	415	148	
2	El Toyo	-1,12	-0,04			-65	2	-5	3	53	44	73	
3	San Alfonso	-1,12	-0,03	74	246					194	-71	117	
4	Colorado-Alfalfal	-4,76	-0,23							767			
5	Colorado- Maitenes	-4,76	-0,17			1835	99	352	89		1587	896	
6	Yeso	-0,29	-0,01	-6	-82					133	97	-14	
7	Volcán	-0,54	-0,02							108	67	24	
8	Colina	-0,32	-0,07							-91	-38		
9	Morado	-0,21	-0,06							-102	-39	-60	
10	Placas	0,00	0,00							0	0	0	
11	Engorda	-0,05	-0,04							18	5		



Tabla 100 Proporción de hábitat WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto (%)

		PROPOR CIÓN CAUDAL (%)	PROPO RCIÓN ALTUR A (%)	PROPORC	PROPORCIÓN HABITAT WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto (%)								
					St juveni	OM adul	OM juveni	TA	TA juveni				
N°	AIA	Q	h medio	St adulto	ı	to	ı	adulto	I	Е	Т	P	
1	Lajas	72%	90%	118%	131%	118%	109%	145%	74%	124%	128%	124%	
2	El Toyo	94%	96%			96%	101%	99%	102%	102%	106%	105%	
3	San Alfonso	94%	98%	103%	104%					103%	98%	103%	
4	Colorado-Alfalfal	35%	71%							126%			
5	Colorado- Maitenes	46%	76%			317%	192%	194%	184%		252%	324%	
6	Yeso	82%	97%	99%	95%					105%	106%	98%	
7	Volcán	86%	97%							105%	105%	103%	
8	Colina	54%	79%							96%	98%		
9	Morado	53%	77%							95%	97%	74%	
10	Placas	100%	100%							100%	100%	100%	
11	Engorda	80%	89%							103%	101%		

Tabla 101 Porcentaje de cambio del hábitat ponderado útil para una condición con proyecto en relación a una condición sin proyecto (WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto -100%).

		CAMBIO CAUDAL (%)	CAMBIO ALTURA (%)	CAMBIO H	CAMBIO HABITAT WUA Con Proyecto / WUA Sin proyecto -100 (%)									
N°	AIA	Q	h medio	St adulto	St juvenil	OM adulto	OM juvenil	TA adulto	TA juvenil	E	Т	Р		
1	Lajas	-28%	-10%	18%	31%	18%	9%	45%	-26%	24%	28%	24%		
2	El Toyo	-6%	-4%			-4%	1%	-1%	2%	2%	6%	5%		
3	San Alfonso	-6%	-2%	3%	4%					3%	-2%	3%		
4	Colorado-Alfalfal	-65%	-29%							26%				
5	Colorado- Maitenes	-54%	-24%			217%	92%	94%	84%		152%	224%		
6	Yeso	-18%	-3%	-1%	-5%					5%	6%	-2%		
7	Volcán	-14%	-3%							5%	5%	3%		
8	Colina	-46%	-21%							-4%	-2%			
9	Morado	-47%	-23%							-5%	-3%	-26%		
10	Placas	0%	0%							0%	0%	0%		
11	Engorda	-20%	-11%							3%	1%			



5. CONCLUSIONES

El presente re-análisis de Caudal Ecológico asociado al PHAM, ha desarrollado una metodología que considera las observaciones emanadas durante el Due Diligence realizado por los Bancos multilaterales en el marco del análisis para el financiamiento del Proyecto.

Por un lado, fue posible incorporar nueva información levantada especialmente para incrementar la resolución espacial y temporal de los análisis originales. Por otro lado, se adoptaron cambios metodológicos en la evaluación hidráulica y eco-hidráulica, al implementar modelos combinados de HECRAS y PHABSIM. Ambos elementos permitieron obtener resultados sobre el hábitat de las especies de relevancia ecológica, y uso antrópico recreativo (rafting/kayak), y con ello verificar los caudales ecológicos asociados al proyecto establecidos por la Dirección General de Aguas (DGA)

El desarrollo del presente estudio consideró la implementación de las siguientes recomendaciones:

- Respecto al sistema de representación fluvial, se incorporaron nuevas secciones topobatimétricas que responden al requerimiento de describir detalladamente las AIA estudiadas. El número y espaciamiento de las secciones cumplió con los criterios recomendados. De forma simultánea se realizaron mediciones de velocidad del flujo, obteniendo una mejor descripción del microhabitat del río/estero.
- Para la caracterización hidrológica se incorporaron estadísticas a escala diaria, principalmente para responder a una mejor descripción de los caudales de estiaje. En cuanto al rendimiento del aporte intermedio de la cuenca, se consideró la recarga de estiaje (menor caudal mensual en curva de variación estacional de probabilidad de excedencia 85%). Se realizó un estudio de estacionalidad para evaluar la tendencia de la serie hidrológica.
- En cuanto a la simulación hidráulica se incorporó efectivamente el efecto de la rugosidad en la profundidad y velocidad, mediante un análisis y calibración que considera el efecto macrorrugoso del escurrimiento dependiendo de la magnitud del caudal.
- Dentro de los criterios de idoneidad de hábitat, se agregaron macroinvertebrados acuáticos como especies de relevancia ecológica, y se incorporó la variable sustrato en la evaluación eco-hidráulica.
- Para la modelación eco-hidráulica y cuantificación de hábitat de las especies, se utilizó el programa PHABSIM, atendiendo a las sugerencias de utilización de un software especialmente diseñado para ello.
- En la evaluación de usos antrópicos de rafting/kayak, se consideró un ancho efectivo (continuo) de 12 m, con la profundidad de 60 cm. Se agregó un análisis para condiciones mínimas en la cual se podría desarrollar la práctica de rafting.



5.1 Modelación hidráulica

5.1.1 Efectos de las características de los cuerpos de agua evaluados en su representación por medio de modelo hidráulico.

Las características naturales del río Maipo, el río Colorado y algunos de los esteros, en relación a su grado de turbulencia, morfología y velocidad de escurrimiento, produjeron dificultades en su caracterización por medio del modelo hidráulico. En el caso del Maipo, en los tramos de San Alfonso y Toyo esta condición imposibilitó la medición de un número importante de aforos (más del 50% solicitado). En el sector de los Maitenes en tanto, solamente pudo ser realizado 1 aforo de 8 solicitados. Adicionalmente, en sectores particulares, posiblemente asociado al oleaje del río, las alturas de escurrimiento medidas durante el aforo fueron normalmente superiores a las topobatimétricas, con lo que los VAF (factor de ajuste de velocidad) para los caudales de calibración fueron superiores a la unidad. Esto fue particularmente notorio en el AIA Lajas, con valores de ajuste de la velocidad que alcanzaron valores cercanos a 1.4 en algunos perfiles, lo que indica una potencial sobreestimación del caudal aforado. Por otra parte, en el tramo característico del AIA San Alfonso, fue necesario dejar sin consideración para la modelación hidráulica y la evaluación de hábitat, dos de los cinco perfiles medidos, debido a que dadas las condiciones mencionadas del río, el modelo hidráulico no fue capaz de representarlos.

En los esteros más pequeños, debido a que los flujos fueron menores, no hubo dificultad en la medición de los perfiles (aunque su tamaño produjo que la topobatimetría tuviera baja resolución). Sin embargo, la relación entre la morfología (principalmente la pendiente longitudinal), el tamaño de la sección y los bajos caudales afectaron la modelación, ya que el Software Hec-Ras presentó inestabilidad en la resolución del eje hidráulico, principalmente en los tramos ubicados aguas abajo. Esto fue apreciado en el estero las Placas, para el que un perfil fue dejado fuera de la calibración. Además, en lo esteros Engorda, Colina y Morado se generaron dificultades en la modelación de caudales bajos.

5.1.2 Resultados calibración

La calibración de las diferentes AIA fue realizada para caudales en el rango de 40-60% de probabilidad de excedencia en la mayoría de los casos. Las principales excepciones correspondieron a las Placas, cuyo caudal de calibración correspondería al mínimo histórico, y a Volcán, con un caudal cercano al caudal medio mensual mínimo de un año seco.

El considerar una representación global del AIA y no una calibración perfil a perfil, permitió obtener un resultado que considerara el efecto del eje hidráulico, en el que la altura de escurrimiento en un punto dado, es capaz de modificar la altura de escurrimiento en un cierto tramo. Por otra parte, en tramos de 50-300 metros, la resistencia al flujo responde a condiciones generales morfológicas del río, lo que justifica determinar un valor de Δn (resistencia al flujo no macrorrugoso) único para cada AIA. La particularidad de cada sección se reflejó en la rugosidad a través de su morfología (representada por el radio



hidráulico), lo que permitió determinar un n₀, asociado a la macrorugosidad, diferente para cada sección. Este último, salvo algunas excepciones como el perfil 8 en el AIA Toyo y el perfil 8 en AIA Volcán, fue similar para todos los perfiles dentro de cada AIA.

Los resultados mostraron que la macrorugosidad explica gran parte de la resistencia al flujo solamente en unos pocos tramos: AIA Lajas, Volcán, Colina y Maitenes con $\Delta n < \sim 10\%$ de n_0), mientras que en los restantes existirían otros factores de relevancia además de la macrorugosidad, asociados posiblemente a la turbulencia del flujo y la generación de resaltos locales en los tramos de mayor velocidad de escurrimiento y a factores de forma en algunos esteros de menor escurrimiento. No obstante lo anterior, la rugosidad está representada principalmente por el efecto macrorugoso en todos los casos ($\Delta n/n_0 < 1$).

La **Tabla 102** presenta un resumen de los valores medios obtenidos para la rugosidad en cada AIA.

AIA	n ₀ promedio (s/m ^{1/3})	Δn (s/m ^{1/3})	Δn / n₀ promedio (%)	Error medio modelación
Lajas	0.031 +/- 0.001	0.0038	12 %	6 %
Toyo	0.036 +/- 0.003	0.02	55 %	9.5 %
San Alfonso	0.039 +/- 0.003	0.014	36 %	7 %
Alfalfal	0.056 +/- 0.003	0.024	43%	7.1 %
Maitenes	0.046 +/- 0.003	-0.006	-13%	5.5 %
Yeso	0.050 +/- 0.003	0.04	80%	9.6 %
Volcán	0.069 +/- 0.005	0.004	6%	8.7 %
Colina	0.076 +/- 0.006	0.002	3%	10 %
Morado	0.048 +/- 0.002	0.04	83%	8.5 %
Placas	0.059 +/- 0.004	0.028	48%	14 %
Engorda	0.069 +/- 0.003	0.0325	47%	7 %

Tabla 102.- Valores medios rugosidad por AIA. (Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar que para evaluar una potencial influencia del caudal en Δn , se requiere de una medición de la altura de escurrimiento en cada tramo modelado, para diferentes caudales.

5.1.3 Resultados modelación, relación Q v/s n y h v/s n.

Se verificó una relación potencial decreciente entre el caudal y el coeficiente de Manning, lo que es esperado, toda vez que la macrorugosidad del flujo aumenta a medida que disminuye la altura de escurrimiento, debido al aumento de la relación Rh/ds, alcanzándose máximos del coeficiente de Manning del orden de 0.1 s/m^{1/3}, obteniéndose estos normalmente para caudales pequeños, dentro del rango evaluado.

Las pendientes medias de los tramos del río Maipo y Colorado fueron del orden de 1% - 2%, mientras que en los esteros varió entre 2% y 4%. De acuerdo a Montgomery y Buffington (1997, ver Figura 12 de dicho estudio), de una serie de cauces evaluados, el coeficiente de Manning para ríos con pendientes en el rango 1% - 4% se concentró entre 0.05 s/m $^{1/3}$ y 0.09 s/m $^{1/3}$, con valores extremos en 0.04 s/m $^{1/3}$ y 0.1 s/m $^{1/3}$



aproximadamente. Así, comparativamente los valores máximos obtenidos para el coeficiente de Manning en las 11 AIA se ubicaron dentro del rango esperado definido en el citado estudio.

Hubo excepciones a la tendencia decreciente de la relación Q v/s n en esteros de bajo escurrimiento, en los que para caudales bajos, los niveles fueron inferiores al tamaño característico del sedimento grueso. En estos casos, para los caudales mínimos, la relación Q v/s n fue creciente.

El estero las Placas fue el único cuerpo de agua que se escapó de la tendencia media de la relación decreciente entre Q y n, posiblemente por su bajo escurrimiento y por la variabilidad de las secciones transversales con el incremento del caudal. En estas, a partir de ciertos flujos se llenan sus llanuras de inundación o cauces secundarios, generando cambios en el radio hidráulico y por ende en la relación Rh/ds.

Cabe destacar que fue considerado un valor de Δn invariable con el caudal. La medición de la altura de escurrimiento en cada tramo modelado, para una condición de flujo diferente, permitiría verificar la relación obtenida. Al respecto, se recomienda realizar nuevas mediciones en aguas bajas en las diferentes AIA (salvo en el caso de las Placas) y en aguas medias/altas a lo menos en los esteros las Placas y Engorda.

5.1.4 Resultados modelación, distribución velocidad

Tal como fue señalado, la condición natural de los ríos impidió medir perfiles de velocidad en diversas secciones de distintas AIA, en tramos con velocidades superiores a los 2 m/s.

Los resultados del factor de ajuste de la velocidad de las AIA ubicadas en tramos de flujo turbulento normalmente presentaron valores superiores a la unidad, debido a la sobreestimación del pelo de agua por parte del perfil de aforo, posiblemente por efecto del oleaje. Por ejemplo en el AIA Lajas el VAF varió entre 1.2 y 1.4. Respecto a los tramos en que hubo aguas calmas o con menor turbulencia, los valores del VAF variaron en torno a la unidad con valores superiores e inferiores a esta, estando tales desviaciones asociadas principalmente al resultado del proceso de calibración del eje hidráulico.

En todos los tramos modelados se observó una tendencia general del VAF de ser creciente con el caudal, lo que es consecuencia de la tendencia decreciente del coeficiente de Manning con el caudal (ver **Acápite 5.1.3**). No obstante, dado que en la relación entre la velocidad de escurrimiento y la rugosidad también debe considerarse la variable del eje hidráulico, las características particulares de cada sección o de cada tramo de AIA evaluado pueden romper la tendencia creciente señalada, como en el caso del perfil 1 de la AIA Lajas (**Figura 87**). Esta situación también podría darse por alguna inconsistencia entre la resolución de las mediciones y la operación del Software PHABSIM para simular velocidades, como la indicada para el perfil 3 del río Yeso.



5.2 Modelación del hábitat

Los resultados de la modelación del hábitat en los ríos Maipo y Colorado indican que la mayoría de las especies de fauna íctica y macroinvertebrados bentónicos evaluadas (72%) se encuentran en una condición subóptima (condición sin proyecto), si se consideran los escenarios de caudal comprendidos entre los hábitat mínimo y promedio registrados actualmente por el río, condiciones que fueron verificadas para el caudal mínimo histórico de 7 días (Q_{7min}) y caudal medio anual (Q_{ma}), respectivamente. Por otra parte y a diferencia de lo anterior, los resultados para los ríos Yeso, Volcán, y los esteros Placas, Colina, Morado y Engorda, indican que las condiciones de hábitat óptimo sí han ocurrido en condiciones actuales, considerando para el caudal mínimo histórico de 7 días (Q_{7min}) y caudal medio anual (Q_{ma}).

Este resultado es consistente con las características de los sistemas estudiados, en términos de sus propiedades hidráulicas y de disponibilidad de alimento. En efecto, según se indica en la línea base CEA (2013), los sistemas estudiados, en particular los río Maipo y Colorado, se caracterizan por tener pendientes importantes, lo que genera velocidades de corriente en general altas. El sustrato que acompaña a estos sistema está compuesto mayoritariamente por bolones y piedras, acompañados en ciertas ocasiones por grava y fango, mientras que la vegetación ribereña observada en los ríos tiende a estar compuesta en su mayoría por árboles y herbáceas, con escasa presencia de vegetación acuática.

Asimismo, Duarte et al. (1971) y Vila et al. (1999) han señalado que en la parte alta de la cuenca la fauna íctica es nula o escasamente representada. Sumado a esto, la baja presencia de peces se corresponde con el patrón natural de los sistemas acuáticos que ocurre en respuesta a una menor disponibilidad de hábitats y un menor nivel de trofía en zonas altas, en comparación a zonas media y baja de los sistemas fluviales (Vannote et al. 1980, Welcomme 1985).

Respecto a los resultados para fauna íctica, se verificó una mejor condición de hábitat para los salmónidos *S. trutta* y *O. mykiss* respecto a la especie nativa *T. areolatus*, lo cual es consistente con los resultados de línea base, donde las especies salmonídeas introducidas son las más representativas del área de estudio, en términos espaciales y de abundancia (CEA, 2013). Sobre esto, Acuña *et al.* (2005) han señalado que las truchas se ven favorecidas en estos ríos andinos, debido a que presentan ventajas adaptativas por ser originarias de ríos de tipo ritrónico.

En cuanto a los resultados para macroinvertebrados bentónicos se observó una mayor disponibilidad de hábitat potencialmente útil respecto a la fauna íctica, así como una mejor condición de hábitat para el orden Ephemeroptera, seguido de Trichoptera y Plecoptera, lo cual es consistente con lo observado en los registros de línea base sobre abundancia de zoobentos (CEA, 2013).

CENTINO DE ECOLOGIA APLICADA

Respecto a los criterios de verificación del caudal ecológico y de otros caudales característicos en las AIA estudiadas, los resultados indican que el caudal que produce el máximo hábitat para cada de las especies evaluadas en las AIA del río Maipo y de río Colorado en Maitenes, no ha ocurrido en condiciones hidrológicas actuales, siendo este caudal menor al caudal mínimo histórico (Q7min). La única excepción la constituyen las especies salmo trutta juvenil y plecópteros en la AIA San Alfonso. Sin embargo, dada la forma decreciente de las curvas WUA v/s Q, un aumento del caudal ecológico en esta AIA no se traduce en una mejora de las condiciones de hábitat.

Por otro lado, en las AIA Yeso y Placas, donde el caudal que produce el hábitat óptimo sí ha ocurrido en condiciones naturales, se verifica que un incremento de caudal en el rango Q_{7min} y Q_{ma} sí se traduce en un incremento del hábitat ponderado útil, dada la forma creciente de la curva de hábitat en ese rango de caudales. Para las AIA Colina, Morado y Engorda, donde los hábitat óptimos también han ocurrido bajo condiciones naturales, el incremento de hábitat se produce sólo para caudales mayores al Q_{ma} .

Adicionalmente, se verificó que el hábitat asociado al caudal ecológico determinado en bocatoma, trasladado a cada AIA mediante la adición de la recarga de la cuenca (ver **Acápite 3.2.3**), es mayor al que se produce bajo una condición promedio (Q_{ma}), para todas las especies presentes en 6 de las 11 AIA evaluadas, que corresponden a las de los ríos Maipo, Colorado y estero Engorda. En el caso de las AIA Morado, Colina, Yeso y Volcán, el 37% de las especies presenta un hábitat bajo caudal ecológico que es menor al que ocurre bajo Q_{ma} , mientras que en la AIA Placas esta situación ocurre para la totalidad de especies evaluadas (tres órdenes de macroinvertebrados).

No obstante lo anterior, se verificó que para 3 de las 11 AIA evaluadas, el caudal ecológico en bocatoma implicaría un caudal pasante por la AIA menor al caudal mínimo histórico del río. Esto se verificó para la AIA Morado ($Q_{eco}=0.24~\text{m}^3/\text{s} < Q_{min}=0.32~\text{m}^3/\text{s}$), AIA Colina ($Q_{eco}=0.37~\text{m}^3/\text{s} < Q_{min}=0.59~\text{m}^3/\text{s}$) y AIA Colorado en Maitenes ($Q_{eco}=4.01~\text{m}^3/\text{s} < Q_{min}=4.6~\text{m}^3/\text{s}$), lo que se traduce que estos sistemas experimentarían un caudal no conocido en términos de su condición hidrológica histórica.

Con estos antecedentes se verifica que el caudal ecológico en general, no se traduce en una pérdida de hábitat respecto a la condición media del río para la mayoría de las especies y AIA evaluadas. Entre los casos en que se observa una pérdida de hábitat de la condición con proyecto respecto a la condición media sin proyecto, el río Yeso podría ver afectada la especia introducida *Salmo trutta* y algunos macroinvertebrados, en tanto que los casos de Volcán, Colina y Morado esta pérdida corresponde exclusivamente a algunos ordenes de macroinvertebrados.

Finalmente y sobre las características del hábitat potencialmente útil, el análisis de sensibilidad realizado utilizando un umbral de corte (CFmin = 0.5), mostró que la calidad del hábitat en el área de estudio es baja.



5.3 Caudal ecológico antrópico

Fueron evaluadas las condiciones para realizar la actividad de descenso en kayak/rafting en las AIA San Alfonso y Toyo.

La condición definida como de requerimientos "mínimos", esto es ancho de 7.5 m y profundidad de 20 cm, estimó caudales ecológicos asociados de 4.889 m³/s y 6.74 m³/s en las AIA Toyo y San Alfonso, respectivamente. Cabe destacar que para ambos casos, los caudales medios mensuales para un año seco permiten cumplir con tales requerimientos durante el período evaluado (octubre – abril).

La condición definida como de requerimientos "medios" o "normales", esto es ancho de 12 m y profundidad de 60 cm, estimó caudales ecológicos asociados de 33 m³/s y 54 m³/s en las AIA Toyo y San Alfonso, respectivamente.

En el caso del AIA Toyo, el caudal ecológico es inferior al caudal medio mensual de todos los meses del período octubre – abril para un año seco (Q_{85}), salvo para el mes de abril, en el que el Q_{85} corresponde a 32.7 m³/s, es decir, es 0.3 m³/s menor a los requerimientos de la actividad.

En el caso del AIA San Alfonso, el caudal ecológico es inferior al caudal medio mensual de un año seco solamente para el período noviembre – febrero. En el caso de marzo y octubre, en un año normal el caudal sería suficiente para sustentar la práctica de la actividad. En abril, en tanto, se requiere un caudal intermedio entre el Q₅₀ (42.7 m³/s) y el Q₁₅ (65.5 m³/s). Considerando la información de la estación fluviométrica Maipo en San Alfonso, la probabilidad de excedencia del caudal de rafting corresponde a un 27% (probabilidad asociada a un caudal medio diario del mes de abril).

El requerimiento para realizar actividades de descenso en kayak/rafting deberá ser confirmado según la información que recopilada en el proceso de monitoreo participativo y plan de divulgación y consultas.



6. REFERENCIAS

ACUÑA, P., VILA, I., PARDO, R. & S. COMTE. 2005. Caracterización espacio-temporal del nicho trófico de la fauna íctica andina del río Maule, Chile. Gayana. 69(1): 175-179.

APR Ingeniería S.A, S/Aa. Estudio sobre los Efectos de las Obras de Toma y Descarga en el Comportamiento Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico del Río Maipo, Anexo IX. Caracterización del Régimen de Caudales Medios Diarios. Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

APR Ingeniería S.A, S/Ab. Estudio sobre los Efectos de las Obras de Toma y Descarga en el Comportamiento Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico del Río Maipo, Anexo XI. Caracterización Hidráulico Mecánico Fluvial. Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

APR Ingeniería S.A, 2013a. Estudios Hidrológicos especiales para re-análisis de caudales ecológicos y evaluación del efecto del cambio climático sobre la disponibilidad futura de recursos hídricos. Parte I. Caracterización de caudales medios diarios en AIA. Preparado para AES Gener, mayo 2013. APR Ingeniería S.A.

APR Ingeniería S.A, 2013b. Estudios Hidrológicos especiales para re-análisis de caudales ecológicos y evaluación del efecto del cambio climático sobre la disponibilidad futura de recursos hídricos. Parte II. Determinación de caudales de recargas intermedias. Preparado para AES Gener, mayo 2013. APR Ingeniería S.A.

CEA, 2013. Actualización línea de base proyecto hidroeléctrico Alto Maipo. Preparado para AES Gener, junio 2013. Centro de Ecología Aplicada.

CEA, 2008. Estudio de caudal ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Elaborado para AES GENER. Centro de Ecología Aplicada.

CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda. 2008. Balance Hídrico de la Hoya del Río Maipo. Anexo 13 Adenda 1 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

CONKLIN, D., CANTON, S., CHADWICK, J., MILLER, W, 1996. Habitat suitability curves for selected fish species in the Central Platte River, Nebraska. *Rivers*, Vol 5, N⁹4, pp. 250-266. S.E.I. & Associates.

DIEZ, **2008**. Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales. Ing. Investig. vol.28 no.2 Bogotá May/Aug. 2008.

DUARTE, W., FEITO, R., JARA, C., MORENO, C. & A.E. ORELLANA. 1971. Ictiofauna del sistema hidrográfico del río Maipo. Boletín del Museo Nacional de Historia Natural 32: 227-268.



EULA, 2000. Determinación del caudal ecológico mínimo del proyecto hidroeléctrico Quilleco en el río Laja, considerando variables asociadas a la biodiversidad y disponibilidad de hábitat. Informe técnico. Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile.

FENGQING L., QINGHUA C., XIAOCHENG F., JIANKANG L. 2008. Construction of habitat suitability models (HSMs) for benthic macroinvertebrate and their applications to instream environmental flows: A case study in Xiangxi River of Three Gorges Reservior region, China. Elsevier Limited and Science in China Press.

FIGUEROA R, PALMA A, RUIZ V & X. NEILL X, 2007. Análisis comparativo de índices bióticos utilizados en la evaluación de las aguas en un río Mediterráneo de Chile: Río Chillán, VIII Región. Revista Chilena de Historia Natural 80: 225-242

FULTON, 2004. A review of the characteristics, habitat requirements, and ecology of the Anadromous Steelhead Trout (Oncorhynchus mykiss) in the Skeena Basin. Junio 2004.

GORDON, N., MCMAHON T., FINLAYSON B., GIPPEL G., NATHAN R. 2004. Stream Hydrology - An introduction for ecologists. 2nd Edition, Wiley.

GORE, J., LAYZER, J., MEAD, J. 2001. Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years: a role in stream management and restoration. Regulated Rivers: Research and management, 17: 527 – 542 (2001). John Wiley & Sons, Ltd.

HUDSON, H., BYROM, A., CHADDERTON, L. 2003. A critique of IFIM—instream habitat simulation in the New Zealand context. Science for Conservation 231. Publicado por el Departamento de Conservación, Wellington, Nueva Zelanda.

JOWETT, I. 2003. Hydraulic constrains on habitat suitability for benthic invertebrates in gravel-bed rivers. River research and applications, 19: 495 – 507 (2003). Wiley InterScience.

MANRIQUEZ, A., HUAQUIN, L., ARELLANO, M., ARRATI, G. 1988. Aspectos reproductivos de Trichomycterus aerolatus Valanciennes, 1846 (Pisces: Teleostei: Siluriformes) en Río Angostura, Chile. Studies on Neotropical Fauna and Environment. Vol. 23 (1988) No. 2, pp. 89 -102.

MONTGOMERY D.R., J.M. BUFFINGTON 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin 109: 596-611.

MOSLEY, M.P. 1983. Flow requirements for recreation and wildlife in New Zealand rivers-A review. Journal of Hidrology (NZ) 22: 152-174.

NIÑO, Y. 2005. Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos. Apuntes del Curso Transporte Hidráulico de Sólidos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.



HARDING, J, MOSLEY, P., PEARSON C., SORREL B. 2004. FRESHWATERS OF NEW ZEALAND. 2004. Editado por NEW ZEALAND HYDROLOGYCAL SOCIETY AND NEW ZEALAND LIMNOLOGYCAL SOCIETY.

PASTENES, **P. 2012**. Diseño e implementación de software de acople a Hec-Ras: cálculo de ejes hidráulicos en lechos macro rugosos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

PCWA, 2008. Juvenile and Adult Rainbow Trot Habitat Suitability Criteria. Placer County Water Agency Middle Fork American River Project (FERC No. 2079). Apéndice A. Abril 2008.

REPÚBLICA DE CHILE. 2008. Decreto Supremo Nº 51 que Oficializa la Primera Clasificación de Especies Silvestres Según su Estado de Conservación. Diario Oficial. Santiago. Chile.

ROOD, S., TYMENSEN, W., MIDDLETON, R. 2003. A comparison of methods for evaluating instream flow needs for recreation along rivers in southern Alberta, Canada. River Research and Applications 19 (2): 123-135

ROOD, S., TYMENSEN, W. 2001. Recreational Instream Flow Needs (R-IFN) for Paddling Along Rivers in Southern Alberta. Submitted to Alberta Environment. Lethbridge, AB. 36 pp.

USDA, 1986. Technical notes, Rainbow Trout. U.S. Department of agriculture, Wyoming, Soil Conservation Service. Enero 1986.

USFWS, **1986**. Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: brown trout. Septiembre 1986. U.S. Fish and Wildlife Service, Department of Interior.

USFWS, 1984. Habitat suitability information: rainbow trout. Enero 1984. U.S. Fish and Wildlife Service, Department of Interior.

USGS, 2001. PHABSIM for Windows. User's Manual and Exercises Midcontinent Ecological Science Center. Noviembre 2001 U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey

VANNOTE, R. L., G. W. MINSHALL, K. W. CUMMINS, J. R. SEDELL, AND C. E. CUSHING. 1980. The river continuum concept. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37: 130-137.

VILA, I, FUENTES, L. Y M. CONTRERAS. 1999. Peces límnicos de Chile. Boletín del Museo Nacional de Historia Natural (Chile). 48:61-75.

WELCOMME, R.L. 1985. River Fisheries. Fao Tech. Pap. 262: 330 pp.

Sitio web Dirección General de Aguas: www.dga.cl.