

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL
RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS MEDIANTE EL SOFTWARE PHABSIM

PRESENTADO POR:
DIEGO ALFONSO GÓMEZ CORTÉS
ERWIN DAVID MOSQUERA CORDOBA

DIRECTOR: Ing. FEDERICO GONZÁLEZ
COORDIRECTORES: Ing JUAN MANUEL DIEZ HERNANDEZ
Ing. NELSON OBREGÓN NEIRA



BOGOTA DC.

ENERO DE 2010

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ASPECTOS GENERALES	3
2.1.	ANTECEDENTES	3
2.2.	JUSTIFICACIÓN	4
2.3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2.4.	OBJETIVO GENERAL.....	6
2.4.1.	Objetivos específicos.....	6
3.	MARCO TEÓRICO	7
3.1.	CONCEPTOS IMPORTANTES	7
3.1.1.	Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GHIR ó IWRM).	7
3.2.	METODOLOGÍA IFIM.....	14
3.3.	CURVAS DE PREFERENCIA.....	23
3.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	25
3.5.	MARCO LEGAL Y NORMATIVO PARA COLOMBIA	28
4.	METODOLOGÍA.....	30
4.1.	APROPIAMIENTO DEL CONOCIMIENTO.....	31
4.1.1.	Transferencia tecnológica	32
4.1.2.	Apropiamiento del PHABSIM	32
4.1.3.	Análisis de la información suministrada.....	32
4.1.4.	Aplicación del PHABSIM y línea base:	33
4.2.	FILTRACIÓN	33
4.2.1.	Filtro opciones HABTAE	34
4.2.2.	Filtro de estadios	34
4.2.3.	Filtro de especies	34
4.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	35
4.3.1.	Generación de combinaciones.	35
4.3.2.	Procesamiento mediante PHABSIM.....	35
4.3.3.	Envoltentes de sensibilidad	35
4.3.4.	Régimen de caudal ecológico	36
5.	RESULTADOS	37
5.1.	APROPIAMIENTO DEL CONOCIMIENTO.....	37
5.1.1.	Transferencia tecnológica	37
5.1.2.	Apropiamiento del PHABSIM	37
5.1.3.	Análisis de la información suministrada.....	37
5.1.4.	Aplicación del PHABSIM y línea base	39
5.2.	FILTRACIÓN	47
5.2.1.	Filtro Opciones HABTAE	47
5.2.2.	Filtro de Estadios.....	72
5.2.3.	Filtro de Especies.....	84
5.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	88
5.3.1.	Generación de combinaciones.	88
5.3.2.	Procesamiento mediante PHABSIM.....	88
5.3.3.	Envoltentes de sensibilidad.	88

5.3.4.	Régimen de caudal ecológico	100
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	107
8.	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1. Serie histórica de caudales	38
Figura No. 2. Hábitat vs. Caudal - Barbus Bogaei	42
Figura No. 3. Hábitat vs. Caudal - Squalius Pirenaicus	44
Figura No. 4. Hábitat vs. Caudal- Chondrostoma Polypepsis	46
Figura No. 5. Modelación del Hábitat Barbus-Adulto	50
Figura No. 6. Modelación del Hábitat Barbus-Juvenil	51
Figura No. 7. Modelación del Hábitat Barbus-Alevín	52
Figura No. 8. Modelación del Hábitat Chondrostoma Polypepsis-Adulto	58
Figura No. 9. Modelación del Hábitat Chondrostoma Polypepsis -Juvenil	59
Figura No. 10. Modelación del Hábitat Chondrostoma Polypepsis -Alevín	60
Figura No. 11. Modelación del Hábitat Squalius Pyrenaicus -Adulto	66
Figura No. 12. Modelación del Hábitat Squalius Pyrenaicus -Juvenil	67
Figura No. 13. Modelación del Hábitat Squalius Pyrenaicus -Alevín	68
Figura No. 14. Comparación de curvas de Preferencia-Profundidad, Alevín	73
Figura No. 15. Comparación de curvas de Preferencia-Velocidad, Alevín	74
Figura No. 16. Comparación de curvas de Preferencia-Sustrato, Alevín	75
Figura No. 17. Comparación de curvas de Preferencia-Profundidad, Juvenil	77
Figura No. 18. Comparación de curvas de Preferencia-Velocidad, Juvenil	78
Figura No. 19. Comparación de curvas de Preferencia-Sustrato, Juvenil	79
Figura No. 20. Comparación de curvas de Preferencia-Profundidad, Adulto	81
Figura No. 21. Comparación de curvas de Preferencia-Velocidad, Adulto	82
Figura No. 22. Comparación de curvas de Preferencia-Sustrato, Adulto	83
Figura No. 23. Envolverte variación -1% a 1% Barbus Bocagei Adulto	89
Figura No. 24. Envolverte variación -5% a 5%, Barbus Bocagei	91
Figura No. 25. Envolverte variación -10% a 10%, Barbus Bocagei	93
Figura No. 26. Comparación errores Promedio Positivos	95
Figura No. 27. Comparación errores Promedio Negativos	96
Figura No. 28. Comparación errores Máximo positivos	97
Figura No. 29. Comparación errores Máximo negativos	98
Figura No. 30. Comparación de los diferentes errores promedios y máximos	99
Figura No. 31. Banda de confianza del Régimen de Hábitat.	101
Figura No. 32. Banda de confianza del Régimen de Caudales Ecológicos.	103

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen No. 1. Gestión Integrada del Recurso Hídrico (Imagen extraída de UNESCO, 2007)	8
Imagen No. 2. Método hidrológico - Imagen extraída de THARME 2008.	10
Imagen No. 3. Método hidráulico Imagen extraída de THARME 2008	12
Imagen No. 4. Método Holístico (Imagen extraída de THARME, 2008).....	13
Imagen No. 5. Diagrama de Metodología IFIM –Extraída de Determinación de Caudales Ecológicos, (DIEZ 2008).	15
Imagen No. 6. Variables Macro y Micro que definen el Hábitat (DIEZ, 2006b)	16
Imagen No. 7. Procedimiento PHABSIM (DIEZ, 2006b)	17
Imagen No. 8. Cálculo por celdas del PHABSIM (DIEZ, 2006b).....	18
Imagen No. 9. Curvas de Preferencia PHABSIM (DIEZ, 2006b)	18
Imagen No. 10. Predicción Régimen de Caudales (DIEZ, 2006b)	19
Imagen No. 11. Diagrama de Flujo Para el Uso del PHABSIM.....	21
Imagen No. 12. Mapa Conceptual del Funcionamiento del Software	22
Imagen No. 13. Esquema del Protocolo de Modelación en Ingeniería	30
Imagen No. 14. Esquema de la Metodología empleada en esta investigación.	31
Imagen No. 15. Perfil longitudinal del río.	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No. 1. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Barbus Bocagei</i> Adulto.	48
Cuadro No. 2. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Barbus Bocagei</i> Juvenil.	48
Cuadro No. 3. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Barbus Bocagei</i> Alevín.	49
Cuadro No. 4. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Barbus Bocagei</i> Adulto.....	53
Cuadro No. 5. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Barbus Bocagei</i> Juvenil.....	54
Cuadro No. 6. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Barbus Bocagei</i> Alevín.....	54
Cuadro No. 7. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Chondrostoma Polypepsis</i> Adulto.....	56
Cuadro No. 8. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Chondrostoma Polypepsis</i> Juvenil.....	56
Cuadro No. 9. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Chondrostoma Polypepsis</i> Alevín.....	57
Cuadro No. 10. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Chondrostoma</i> <i>Polypepsis</i> Adulto.	62
Cuadro No. 11. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Chondrostoma</i> <i>Polypepsis</i> Juvenil.	62
Cuadro No. 12. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Chondrostoma</i> <i>Polypepsis</i> Alevín.....	63
Cuadro No. 13. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Squalius Pyrenaicus</i> Adulto.	64
Cuadro No. 14. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Squalius Pyrenaicus</i> Juvenil.....	65
Cuadro No. 15. Diferencia de modelos HABTAE para <i>Squalius Pyrenaicus</i> Alevín.	65
Cuadro No. 16. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Squalius</i> <i>Pyrenaicus</i> Adulto.....	69
Cuadro No. 17. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Squalius</i> <i>Pyrenaicus</i> Juvenil.....	70
Cuadro No. 18. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para <i>Squalius</i> <i>Pyrenaicus</i> Alevín.....	70
Cuadro No. 19. Diferencia Porcentual entre las variaciones de 10 y 20%- <i>Barbus</i> <i>Bocagei</i>	85
Cuadro No. 20. Diferencia Porcentual entre las variaciones de 10 y 20%- <i>Chondrostoma Polypepsis</i>	86
Cuadro No. 21. Diferencia Porcentual entre las variaciones de 10 y 20% - <i>Squalius Pyrenaicus</i>	87
Cuadro No. 22. Valores de Variación Para el Rango del -1 al 1%.....	90
Cuadro No. 23. Valores de Variación Para el Rango del -5 al 5%.....	92
Cuadro No. 24. Valores de Variación Para el Rango del -10 al 10%.....	94
Cuadro No. 25. Regímenes de Hábitat.....	101
Cuadro No. 26. Regímenes de Caudales.....	103

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo, diversos países han visto la necesidad de preservar el recurso hídrico y la vida que de él depende, con el fin de asegurar su futuro y el del medio ambiente. Una de las herramientas que sirve para este fin, es el denominado régimen de caudales ambientales. En países como Colombia, se tiene un conocimiento muy pobre respecto a este tema, por tanto, teniendo en cuenta la gran biodiversidad que se encuentra presente en el país, se hace necesario comenzar a formular una normatividad adecuada para la regulación del impacto que generan las obras hídricas en el ambiente.

En este proyecto se muestra una de las metodologías que puede llegar a incluirse en la normatividad para la regulación del impacto sobre el recurso hídrico, ya que es una de las más usadas en el mundo. Se trata de la metodología de Flujo Incremental para la Asignación de Caudales Mínimos, IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Esta metodología implica una modelación hidráulica y una modelación de hábitat.

A partir de este proyecto se pretende determinar qué tan sensibles son los modelos de hábitat y cómo afecta una variación de éstos en la determinación de los regímenes de caudales ecológicos, específicamente los parámetros. Es importante resaltar que en Colombia, a pesar de existir una gran biodiversidad, no se tienen los suficientes estudios para la construcción de las curvas de preferencia (información ecológica) necesarias para este tipo de modelos.

Es por esto que ante la pobre y casi inexistente información ecológica (curvas de preferencia) que existe en Colombia, en este proyecto y como un primer acercamiento, se desarrolló un análisis de sensibilidad con información ecológica de especies Europeas (*Chondrostoma Polipepsys*, *Barbus Bocagei*, *Squalius Pyrenaicus*), dada su fácil consecución.

Cabe resaltar que la ingeniería se soporta en modelos, lo cual implica tener claro el protocolo de modelación y sus diferentes etapas. Este proyecto se encuentra enmarcado dentro del protocolo de modelación en ingeniería, más específicamente entre las etapas de calibración y validación de los modelos y la creación de escenarios, que es donde se encuentra el análisis de sensibilidad e incertidumbre paramétrica.

Este proyecto se encuentra conformado por 6 capítulos que son descritos a continuación.

El segundo capítulo contiene una descripción general de los antecedentes, la justificación y la problemática en las cuales se basa el proyecto y por último contiene los objetivos formulados en esta investigación.

En el tercer capítulo se presenta el marco teórico que contiene la descripción de ciertos términos y conceptos de vital importancia para el desarrollo de este proyecto tal como son: la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH); la definición de Ecohidrología, los componentes y objetivos que tiene esta disciplina; una diferenciación entre los conceptos de caudal ecológico y caudal ambiental, junto con la descripción de los diferentes tipos de metodologías empleadas tanto mundialmente como localmente para su determinación; también se encuentra una descripción de la metodología IFIM y el funcionamiento del programa PHABSIM, que se emplea en uno de los pasos de esta metodología; finalmente se muestran las diferentes metodologías existentes para realizar un análisis de sensibilidad. Debido a que es importante situar este proyecto en el contexto colombiano, en la parte final de este capítulo se realiza una reseña de la normatividad existente en Colombia relacionada con la determinación del caudal ecológico.

El cuarto capítulo muestra la metodología que se siguió para la realización de este proyecto. En el quinto capítulo se tienen los resultados obtenidos para los diferentes pasos de la metodología. Por último, se tienen las conclusiones y recomendaciones que surgieron a partir de la realización de este proyecto.

2. ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se mostrarán aspectos básicos para el entendimiento del por qué se realiza este proyecto y la importancia del mismo.

2.1. ANTECEDENTES

La metodología IFIM, desarrollada por el servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos ("U.S. Fish and Wildlife Service". (Bovee and Milhous, 1978), se implementó primero en los ríos del Oeste de este país y en 1991, después de ser aprobada por la Corte Suprema de los Estados Unidos como herramienta válida para la negociación del uso del agua, su utilización se amplió a otros estados como California, Nevada, Oregon, Washington e Idaho. A finales de los años noventa, la metodología tuvo una gran acogida y se popularizó su utilización en diferentes países de Latinoamérica tales como Chile (2001), donde fue implementado en un estudio orquestado por la Dirección Nacional de Agua a través de su Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, en compañía del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

En Colombia se encuentran algunos casos documentados acerca de la utilización de esta metodología como es el caso de dos ponencias presentadas en el XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. En el primer caso se modelaron y optimizaron los datos hidráulicos para un estudio de caudales ecológicos en el Río Magdalena, a la altura del Canal de Dique (Diez, 2006b), y en el segundo caso se determinó el régimen de caudales ecológicos en un tramo del río Palacé, en el departamento del Cauca (Diez, 2004).

Por otro lado la sensibilidad del programa PHABSIM en función de los parámetros ecológicos del software, se ha estudiado en el mundo principalmente respecto a la sensibilidad en el Salmón Salar en zonas del Atlántico, en donde a diferentes cambios de entornos y a diferentes épocas, se crearon distintos escenarios en donde la información ecológica se modifica obteniendo cambio significativos en el régimen de caudales ecológicos finales, creando con esto relaciones entre la superficie útil ponderada (SPU¹) y la densidad de poblacional encontrado valores de correlación entre 0.18-0.95. Otra relación encontrada fue entre el Índice de

¹ SPU: Superficie de cauce inundado que puede ser potencialmente usado por una población o un estado de desarrollo.

Aptitud del Hábitat (HSI²) y la disponibilidad del hábitat junto con los patrones de convivencia relativos, encontrando una dependencia casi directa entre ellos. (Gibbins, Moir, Soulsby y Youngson, 2005), (Bourgeois, Cunjak, Daniel y Richard, 1996).

Otros países donde ha sido implementada esta metodología con éxito son España (Diez, 2005), Canadá (Leclerc, 1994) y Australia (Gippel, 1995). En algunos países europeos, la metodología IFIM se ha implementado con algunas modificaciones, como es el caso de Inglaterra con Armitage y Ladle, 1989 y Brown, 1989; Francia con Fragnoud, 1987; Italia con Saccardo, 1996; Noruega con Heggenes, 1994; Portugal con Costa, 1988, entre muchos otros países.

2.2. JUSTIFICACIÓN

El agua como recurso natural, ha sido explotada indiscriminadamente por el hombre en los últimos siglos, generando que fuentes hídricas importantes no sean ambientes propicios para el desarrollo de la vida acuática. Los regímenes de caudales ambientales y/o ecológicos, como herramienta de gestión del agua, generan un adecuado manejo del recurso hídrico en función de los ecosistemas y también de las necesidades del ser humano.

En los caudales ecológicos, existe una premisa que dice: “No hay mejor régimen de caudales ecológicos que el régimen natural de caudales” (DIEZ, 2008), esto quiere decir que los diferentes ecosistemas se han adecuados al régimen hidrológico natural, siendo este último el régimen óptimo, sin embargo, es necesario tener en cuenta las necesidades que tiene el ser humano para su supervivencia y desarrollo. Es precisamente esta dicotomía la que pretende resolver un régimen de caudales ambientales.

En Colombia las metodologías más usadas para determinar un caudal ecológico consisten en mantener un caudal estable durante todo el año, lo cual permite un gran aprovechamiento del recurso hídrico por parte del ser humano, pero por el contrario, los ecosistemas dependientes de este recurso se van a ver muy afectados, debido a que al mantener un caudal constante y no un régimen, la necesidad de agua de las especies en algunas épocas no se verá satisfecha.

En el mundo, por el contrario, la tendencia actual es implementar metodologías en las cuales se evalúe de manera integral el bienestar humano junto con el del

² HSI: Valor asignado a cada unidad del terreno de acuerdo a los requerimientos de cada especie. Varía entre 0 y 1

medio ambiente. Un ejemplo de este tipo de metodologías es la metodología conocida como IFIM, de la cuál se tiene poco conocimiento en Colombia.

El software PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) se usa dentro de la metodología IFIM para determinar el hábitat disponible de una especie determinada en un tramo estudiado. Este software consta de un procesamiento hidráulico y otro ecológico, el cual involucra específicamente las curvas de preferencia de una especie determinada. En Colombia actualmente son insuficientes los estudios relacionados con las curvas de preferencia de las especies endémicas y también exóticas. Lo anterior resulta ser una limitante al aplicar esta metodología, no obstante, como ya se mencionó anteriormente, es de vital importancia para el país adoptar una metodología más elaborada como norma, que bien puede ser la metodología IFIM.

En este sentido, debido a que en Colombia se tiene una gran incertidumbre referente a las variables ecológicas (curvas de preferencias), resulta sumamente importante establecer qué tan grande es la variación de los resultados en función de dicha incertidumbre, lo cual se puede obtener mediante un análisis de sensibilidad paramétrica como un primer acercamiento.

Este análisis de sensibilidad se hizo con información biológica de especies europeas (debido a la poca información existente en el medio colombiano), sentando así un referente para un posterior análisis de sensibilidad con información de especies tropicales propias de la región colombiana.

Adicionalmente, mediante este proyecto también se busca contribuir a la falta de entendimiento sobre la metodología en cuestión, en especial sobre el software PHABSIM, razón por la cual se incluye una guía para la utilización de este programa.

2.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Partiendo del hecho que la metodología IFIM puede ser una de las candidatas a ser norma en Colombia para la determinación de caudales ambientales, se hace evidente la problemática mencionada anteriormente que se refiere a la incertidumbre de las curvas de preferencia de las especies colombianas. Lo anterior conlleva a que dicha incertidumbre se traslade igualmente a los resultados obtenidos mediante el software PHABSIM.

A la fecha en Colombia no se han desarrollado investigaciones orientadas a la sensibilidad de los parámetros ecológicos dentro del PHABSIM, entre otras cosas,

porque son pocos los casos de aplicación de este programa en el medio colombiano, y a su vez, porque dichos parámetros (las curvas de preferencia) no han sido desarrollados ampliamente para las especies características de esta región tropical. No obstante, a pesar de que en esta investigación se emplearon especies e hidrosistemas españoles, este proyecto resulta ser el primer acercamiento en Colombia a la relación que existe entre la incertidumbre de los parámetros ecológicos introducidos en el programa y sus respectivos resultados.

Lo anterior es vital para el contexto colombiano, pues a pesar de que se basa en especies e hidrosistemas foráneos, se hace evidente la estrecha relación que existe entre la incertidumbre de las curvas de preferencia y la sensibilidad del software a la luz de estos parámetros.

Este proyecto busca precisamente resolver esta inquietud mediante un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos con PHABSIM, basado en variaciones porcentuales de las curvas de preferencia de una especie cualquiera.

A raíz de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el desempeño de la metodología IFIM, específicamente del software PHABSIM, en un hidrosistema cualquiera haciendo énfasis en la sensibilidad de los parámetros ecológicos a la luz de la cantidad y la calidad de los mismos?

2.4. OBJETIVO GENERAL

Implementar el software PHABSIM a un hidrosistema cualquiera para realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros ecológicos que intervienen en la determinación de regímenes de caudales ecológicos.

2.4.1. Objetivos específicos

- Aplicar el software PHABSIM a un hidrosistema basado en datos reales o generados mediante la simulación de Monte Carlo.
- Evaluar el desempeño del software PHABSIM cuando se tiene escasez de datos ecológicos, mediante un análisis de sensibilidad de parámetros.
- Establecer mediante un análisis de sensibilidad paramétrica las curvas de preferencia de la especie escogida y el régimen de caudales ecológicos del hidrosistema.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. CONCEPTOS IMPORTANTES

Los conceptos que se describirán a continuación, fueron tomados del artículo *Relaciones de la Ciencia del Flujo-Ecología (UNESCO 2003)*.

3.1.1. Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GHIR ó IWRM).

La gestión integrada del recurso hídrico es un “proceso mediante el cual se promueve el desarrollo coordinado y la administración del agua, tierra y recursos relacionados, en orden para maximizar el resultado económico y bienestar social de una manera justa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (UNESCO, 2007). En inglés a este proceso se le conoce cómo Integrated Water Resources Management (IWRM).

La base en que se fundamenta la GIRH es en el reconocimiento de naturaleza finita que tiene el agua y su importancia tanto para la sociedad como para el ambiente, de tal forma que se tenga en cuenta una repartición adecuada de la misma y se le de un valor económico adecuado. Uno de los propósitos de la GIRH es brindar herramientas o instrumentos administrativos que permitan facilitar el logro de las metas que se proponen los encargados de administrar el agua. Unos ejemplos de estas herramientas son reformas institucionales, articulación de los derechos del agua, herramientas técnicas y científicas entre muchas otras que permiten una mejor gestión de recurso hídrico.

La GIRH es un proceso que se realiza de tal forma que sea adaptativo, debido a que en muchas ocasiones las condiciones del ambiente cambian drásticamente (el cambio puede ser social, político o del medio ambiente) lo que genera que la gestión se tenga que adaptar a nuevas necesidades. Dentro de la GIRH se encuentran incluidas varias herramientas o disciplinas tales como la Ecohidrología, Hidrobiología, Hidroecología, Caudales Ecológicos y la Ecohidráulica. La relación entre estas disciplinas se presenta en la Imagen No. 1.

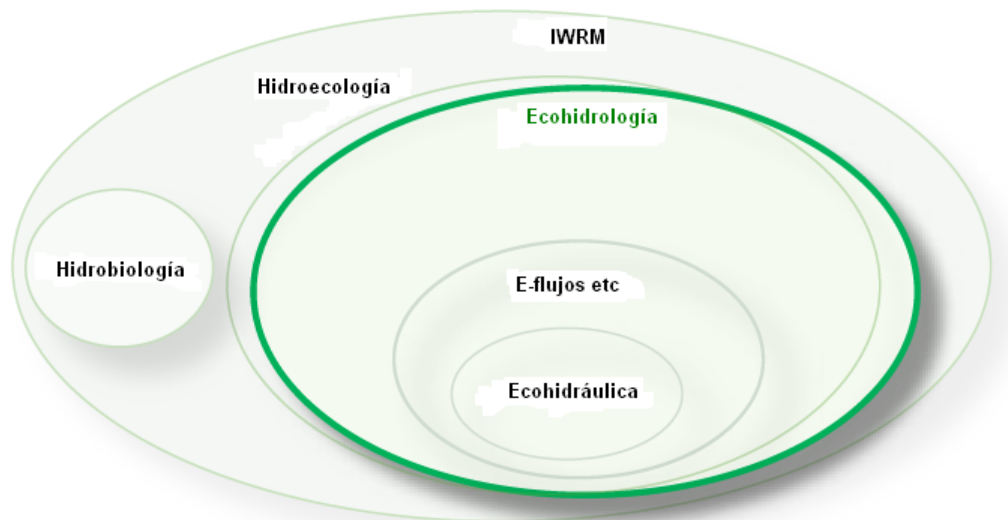


Imagen No. 1. Gestión Integrada del Recurso Hídrico (Imagen extraída de UNESCO, 2007)

3.1.2. Ecohidrología

La Ecohidrología es la disciplina que considera las relaciones que se presentan entre la hidrología, los procesos acuáticos de un hidrosistema y la biota³. El concepto de la Ecohidrología surgió a partir de la conferencia internacional sobre el agua y el ambiente, llevada a cabo en Dublín en 1992, en la cual se planteó la necesidad de formular nuevas soluciones y conceptos para lograr una sostenibilidad en el uso del recurso hídrico.

Para la definición de la Ecohidrología se tienen dos vertientes principales: una que se refiere a la Ecohidrología acuática y otra que hace referencia a la Ecohidrología terrestre. A continuación se muestran ambas definiciones.

- Ecohidrología acuática: en esta división los procesos del ecosistema son usados como herramientas para encontrar las fórmulas administrativas del recurso hídrico. Un ejemplo de esto es cuando el agua transporta una cantidad de nutrientes mayor a la acostumbrada, lo cual puede generar eutrofización y cambiar el ecosistema de la región. En este caso lo que hace la Ecohidrología es tratar de regular los procesos hidrológicos y ecológicos de tal forma que se genere el menor impacto posible y se produzca una integridad entre el uso del agua generado por el hombre y el ecosistema. La perspectiva ecohidrológica de esta tendencia está basada en “el supuesto de que la administración sostenible depende de la rehabilitación y mantenimiento del proceso fluvial establecido, ciclo

³ Biota: es el conjunto de fauna y flora presente en una región.

nutrientes y energía del flujo” (Naiman, Bun, McCLain, Vörösmarty, Zalewski, 2007).

- Ecohidrología terrestre: Este enfoque es más una subdivisión de la hidrología y se enfoca en el proceso ecológico que se lleva a cabo dentro del ciclo hidrológico. Siendo así, se están teniendo en cuenta más los procesos que ocurren dentro del suelo, la energía termodinámica y la transpiración de la superficie que la ecología del medio como tal.

3.1.3. Ecohidráulica

El término de Ecohidráulica hace referencia a los enlaces existentes entre los procesos físicos y las respuestas ecológicas que se presentan en los ríos, lagunas y ciénagas entre otras. La Ecohidráulica se relaciona íntimamente con la Ecohidrología, ya que pretende integrar la ingeniería, la biología y la química para llegar a una mitigación del impacto, pero permitiendo que se satisfagan las necesidades humanas.

3.1.4. Hidrobiología

La hidrobiología es la encargada de estudiar los procesos de vida que ocurren en el agua. La hidrobiología incluye los estudios taxonómicos, la biología económica, la biología industrial y la fisiología de las diferentes especies. La hidrobiología es más una herramienta para el entendimiento del funcionamiento del ecosistema que una herramienta para la solución de la gestión del recurso hídrico.

3.1.5. Caudales Ecológicos y/o Ambientales

Caudal ecológico se entiende como “el flujo mínimo de agua para mantener la biota acuática y procesos ecosistémicos” (Tharme, 2006) y el necesario para asegurar la supervivencia y dinámica de las especies que habitan un cuerpo de agua determinado, teniendo en cuenta que éste se va a ver afectado por la realización de un proyecto cualquiera. Por otra parte aparece el concepto de caudal ambiental, que se refiere a aquel caudal que asegura un equilibrio entre las necesidades humanas de agua y la supervivencia de los ecosistemas, encontrando así la principal diferencia entre el caudal ecológico y el caudal ambiental, en donde este último toma en consideración las necesidades humanas.

Pero para la supervivencia de las especies (ecosistemas) no es necesario únicamente asegurar un caudal ecológico mínimo ó constante sino un régimen de caudales ecológicos que asegure el buen funcionamiento de los ecosistemas durante todo el año hidrológico.

Metodologías para la determinación de caudales ecológicos

Para determinar los caudales ecológicos y ambientales se tienen varias metodologías entre las que se encuentran las metodologías hidrológicas, metodologías hidráulicas, simulaciones de hábitat (ecohidráulicas) y metodologías holísticas. A continuación se hará una breve descripción de cada una de estas metodologías:

- a. Métodos Hidrológicos: este se basa en tratamientos estadísticos de series de caudales para obtener un caudal mínimo o régimen de caudales. Es una expresión en porcentaje de la curva de duración de caudales o un porcentaje de los caudales medios anuales asociados a un periodo de retorno determinado. Este tipo de metodologías requieren estudios simples y son mucho más económicas que otras. Gracias a esto han sido las de mayor proliferación a nivel mundial y se han aplicado a gran diversidad de ecosistemas. En Colombia y según el IDEAM, este enfoque también se ve directamente relacionado con el índice de escasez que se define como “la relación porcentual de la demanda de agua, ejercida por las actividades sociales y económicas en su conjunto para su uso y aprovechamiento, con la oferta hídrica disponible neta” (Rivera et al, 2004).

Una de las metodologías más utilizadas en este tipo de enfoque es la conocida como Aquatic Base Flow desarrollada por USFWS en 1980. Esta metodología consiste en calcular un caudal ecológico como la media aritmética de las medianas de los caudales medios diarios del mes de agosto, para los años que se posea información.

En otra de las metodologías utilizadas, se toma la curva de duración de caudales y el caudal ecológico es aquel que se encuentre en entre el 10 – 40% de ocurrencia. (Ver Imagen No. 2).

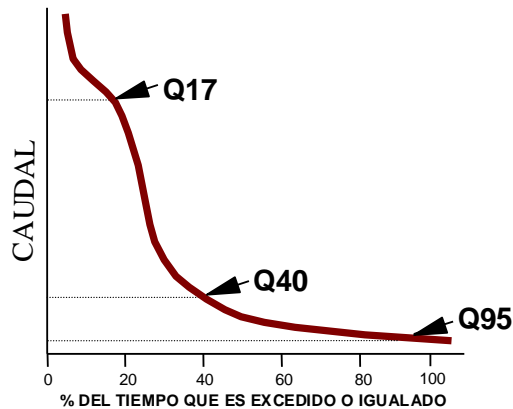


Imagen No. 2. Método hidrológico - Imagen extraída de THARME 2008.

Otras metodologías que se tienen en este enfoque son:

- Metodología de Tenannt (1970).
- Legislación francesa: la cual sugiere un caudal mínimo cualitativo (que conserva la calidad de vida de las especies) y un caudal mínimo cuantitativo (la quinta parte del caudal medio interanual).
- Principado de Asturias: donde el caudal está en función de una constante y del uso que se le de al recurso hídrico.
- Nueva Inglaterra: donde el caudal ecológico se considera como el caudal mínimo histórico.
- Norte de España: es el que garantiza la vida y reproducción de las especies endémicas.
- Confederación Suiza: la cual depende de si el agua es utilizada para actividades piscícolas o si es agua natural

Este tipo de enfoque tiene como ventajas que es simple, rápido y no exige gran inversión. Necesita poca cantidad de datos y se puede regionalizar haciendo que se pueda aplicar a ríos con diferentes tipos de ecosistemas. Las desventajas que presentan estas metodologías hacen referencia a que hacen parte de un enfoque simplista que tiene ausencia casi total de variables ecológicas dentro de sus cálculos. No tienen en cuenta que los Ecosistemas poseen un régimen de funcionamiento y no un caudal único. Tiene una baja flexibilidad. No es recomendable su aplicación a proyectos que puedan producir grandes impactos. En esta metodología no se contempla una negociación del régimen de agua definitivo, lo cual, de cierta forma, va en contra de los principios de la GIRH.

- b. Metodologías hidráulicas: Los métodos hidráulicos son aquellos en los cuales se analiza la variación de diferentes parámetros hidráulicos en ciertas secciones que se consideren críticas debido a su importancia en el tramo fluvial de estudio. Uno de los métodos más conocidos en este enfoque es el del “Método del Perímetro Mojado” que fue implementado por F. Nelson en el Año de 1980 (DIEZ, 2006a). Este método consiste en desarrollar una relación entre el perímetro mojado y el caudal que pasa, generando de esta forma una curva en cuya abscisa se encuentra el caudal y en las ordenadas se encuentra el perímetro mojado. Está gráfica presenta un punto de inflexión que determina el valor del caudal ecológico, ya que se supone que allí las condiciones de hábitat son óptimas para la zona de estudio y, al considerarse la sección como crítica, se asegura que para el resto de las secciones las condiciones se mantengan o sean mejores (ver Imagen No. 3).

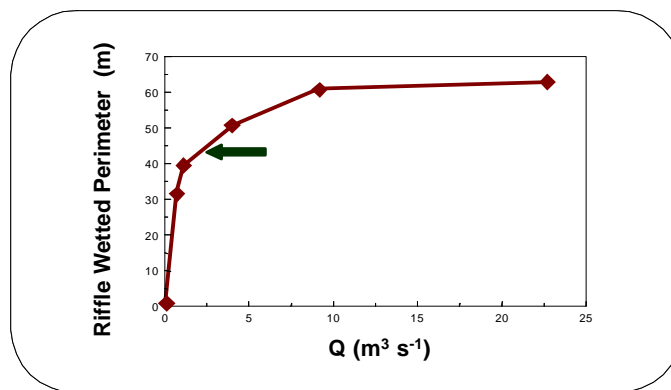


Imagen No. 3. Método hidráulico Imagen extraída de THARME 2008

Otra de las metodologías presente en este enfoque es la conocida como "R2Cross" creada por Espegren en 1996. Esta metodología combina la simulación hidráulica con los requerimientos básicos de las especies en cuanto profundidad, velocidad y sustrato, esta metodología fue desarrollada para el río Colorado en USA.

- c. Simulación de hábitat: este tipo de enfoque desea cuantificar y cualificar la cantidad de hábitat utilizable para una especie de referencia o un conjunto de estas, generando modelos en diferentes condiciones hidrológicas y en diferentes escenarios fisiológicos de la especie seleccionada. La metodología mundialmente más utilizada de esta vertiente es la metodología IFIM (Instreaml Flow Incremental Methodology) la cual se fue desarrollada por el servicio de pesca y vida silvestre de EEUU. Está metodología tiene como base la interdisciplinarietà para lograr un adecuado ordenamiento del agua superficial teniendo un profundo enfoque ambiental y con unas bases técnicas sólidas (DIEZ, 2008).

La metodología IFIM se trata de un marco conceptual y analítico completo que incorpora enfoques Ecohidráulicos y Ecohidrológicos avanzados, con el objeto de evaluar los efectos que provocan cambios incrementales de caudal en la estructura del cauce, la calidad del agua, la temperatura y la disponibilidad de hábitat físico utilizable, utilizando una combinación de datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos. Si bien IFIM fue concebida para ser aplicada en pequeñas corrientes salmonícolas del oeste de EEUU, su empleo se ha extendido ampliamente a zonas disimilares. (DIEZ, 2006a)

Esta metodología será explicada con mayor profundidad más adelante.

Este tipo de enfoque presenta como ventajas una excelente solución de la relación Hábitat-Flujo para una biota específica. Permite observar el

comportamiento de diferentes posibilidades de caudales ecológicos para varias especies, estadios, y geometrías del cauce. Es una herramienta con gran soporte técnico y de gran aceptación.

Las desventajas que posee este tipo de enfoque es que se basa en una especie objetivo y no en el ambiente como tal. Es una metodología que no es aplicable para hábitats en los que sólo se tiene vegetación. Requiere una gran inversión de tiempo, dinero y datos para su aplicación.

- d. Métodos holísticos: son aquellos que están de intermedio entre los métodos hidrológicos y los de simulación de hábitat. En estos métodos se ve todo como un sistema en donde un cambio en alguno de sus componentes puede generar cambios en el resto del sistema. Este enfoque fue desarrollado en Sur África y Australia, luego los siguieron USA y el Reino Unido. Este enfoque desarrolló procesos para establecer los caudales ambientales en diversas situaciones, tanto en situaciones en las que se tienen limitantes de recursos o datos, como situaciones que tienen gran cantidad de recursos y datos. En este enfoque se distinguen 4 niveles como se observa en la Imagen 4.

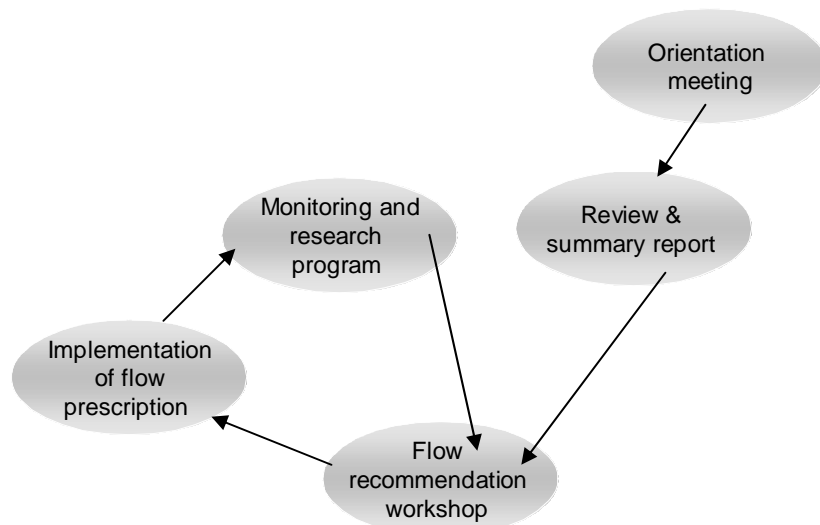


Imagen No. 4. Método Holístico (Imagen extraída de THARME, 2008).

1. Análisis hidrológico: en esta parte se realizan estudios preliminares, se usan herramientas para evaluar posibles alteraciones en el régimen hidrológico y se efectúa el informe correspondiente.
2. Enfoque de un grupo de expertos: taller de expertos del cual debe salir una recomendación de caudales ecológicos.
3. Implementación: en esta etapa se implementan las recomendaciones obtenidas del taller de expertos.
4. Refinamiento de adaptación: es el seguimiento posterior que se le hace a las recomendaciones y también hace referencia a las medidas correctivas que se deban aplicar de ser necesarias.

3.2. METODOLOGÍA IFIM

La metodología IFIM fue desarrollada por un grupo interdisciplinario del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (U.S. Fish and Wildlife Service) para la asignación de regímenes de caudales ambientales, que toma en consideración información biológica e hidrológica como otras consideraciones generales del sistema hídrico, para definir un régimen de caudales mínimos aconsejables asociado a un proyecto de utilización de recursos hídricos, cuyo régimen natural es o será afectado por una obra de ingeniería.

En la determinación del régimen de caudales ecológicos mediante esta metodología, es de vital importancia escoger con anterioridad una especie que represente el ecosistema o sea el objeto de estudio, claro está que en un proyecto se pueden involucrar varias especies.

Esta metodología cuenta con cuatro categorías basadas en principios ecológicos (Espinoza, 2001) y son:

- *Régimen hidrológico del cauce*: Caudal en el tramo del río de estudio en función del tiempo.
- *Estructura del Hábitat*: Esta categoría incluye las propiedades hidráulicas e hidrológicas del cauce, también modelos matemáticos (determinación de variables hidráulicas).
- *Calidad del Agua*: Caracterizar la calidad del curso de agua del tramo de estudio individualizando procesos químicos relevantes.
- *Fuentes de alimentación e interacciones bióticas*. Aquí se tiene en cuenta modelos poblacionales para predecir el comportamiento de la o las especies objetivo.

Etapas de la Metodología IFIM

La metodología por su carácter interdisciplinario cuenta con cinco grandes etapas que involucran variables biológicas, hidráulicas y legales como se muestra en la Imagen No. 5:

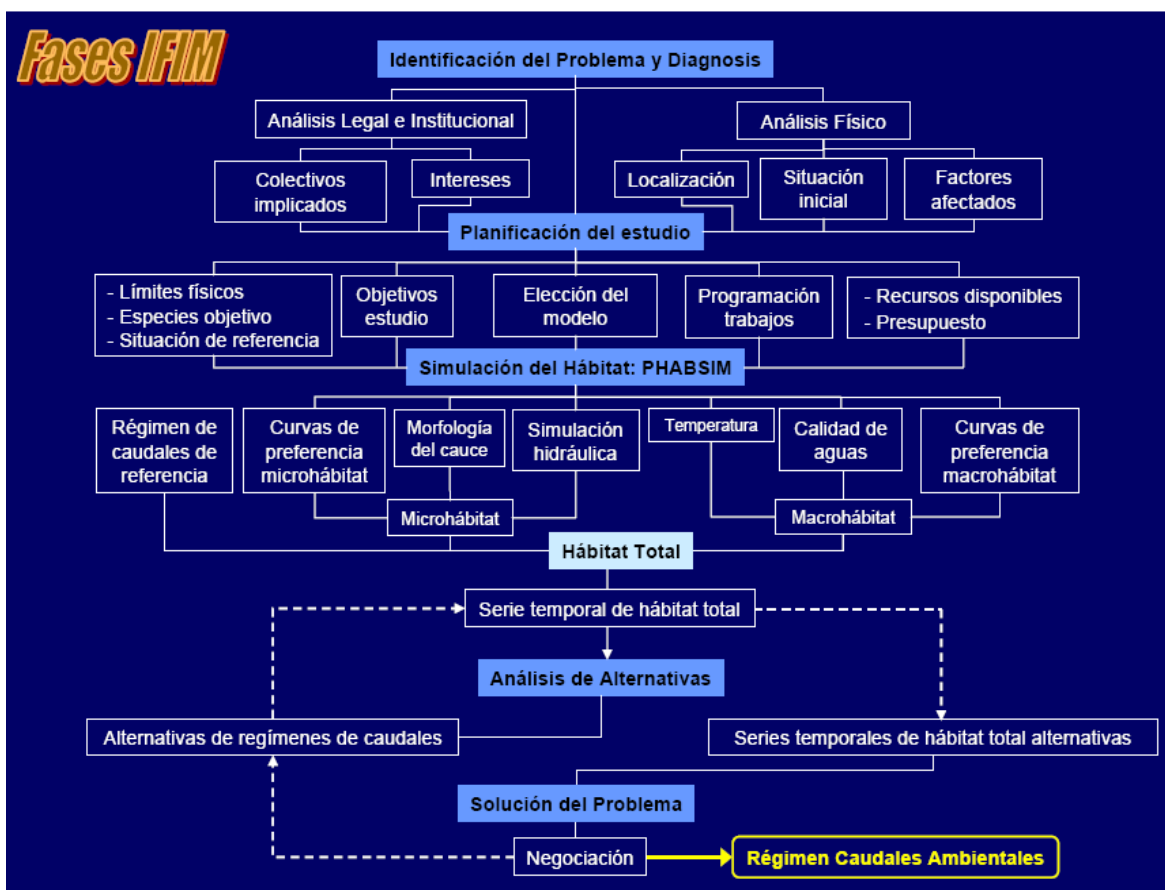


Imagen No. 5. Diagrama de Metodología IFIM –Extraída de Determinación de Caudales Ecológicos, (DIEZ 2008).

A continuación se desarrolla cada una de estas etapas.

- I. **Identificación del Problema:** Posteriormente a la propuesta del cambio en la gestión del agua se siguen dos procesos:
 - *Análisis jurídico-institucional:* En esta etapa se identifican todas las partes interesadas y afectadas teniendo en cuenta sus inquietudes, se brinda información oportuna y veraz, dando una mejor comprensión del proyecto con sus probables impactos y los objetivos que pretende lograr cada una de las partes incluidas en el proceso.
 - *Análisis físico:* Este ítem comprende la ubicación y extensión geográfica con los probables cambios físicos y químicos del sistema; también tiene en cuenta los recursos acuáticos más importantes en la zona con sus objetivos dentro de la gestión.

- II. **Planificación.** Se analiza la información existente y la obtenida en la etapa previa, enfatizando en la preocupación e intereses de cada grupo inmerso en el proyecto, debatiéndola y llegando a acuerdos del qué, cómo, por qué,

dónde, cuándo; sin olvidar los objetivos y la información de cada una de las partes. Esta se hará teniendo en cuenta:

- La escala temporal y espacial de las evaluaciones.
- Las variables importantes para la información que se necesita.
- Cómo la información se obtendrá en caso de que no exista.
- Presupuesto y recursos disponibles.
- Objetivo del estudio y elección del modelo.

Por último, se dejará un plan de estudio por escrito en donde se especifica la determinación y obtención de datos que tengan que ser completados. Sincronización de los datos para el modelo de entrada, ensayo y calibración; estimación de la mano de obra, equipos y viajes necesarios de acuerdo con el plazo de estudio.

III. Simulación del Hábitat

En esta etapa se seleccionan los lugares de muestreo para la recolección de los datos utilizados en los modelos de predicción. Estos datos incluirán variables hidráulicas y ecológicas que se utilizarán en la relación entre el caudal y la proporción de hábitat utilizable. La disponibilidad total del hábitat de la especie se sintetizará mediante la integración de variables de macrohábitat y microhábitat (ver imagen 5)

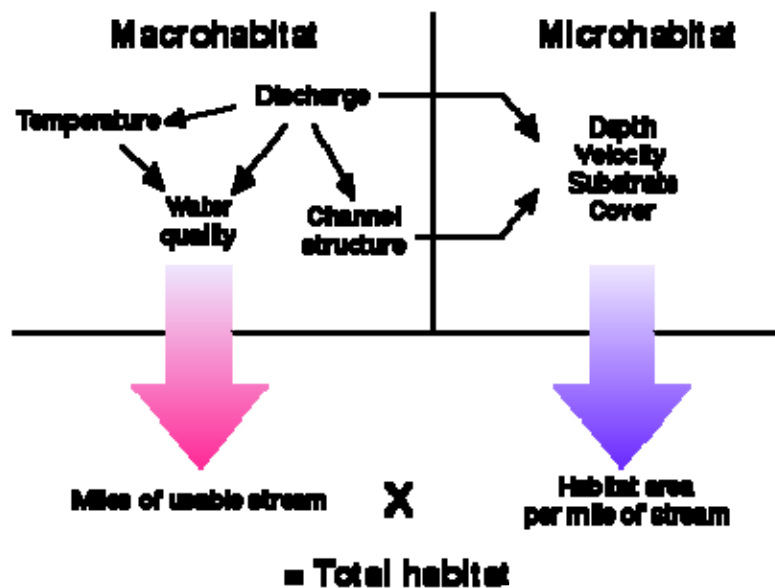


Imagen No. 6. Variables Macro y Micro que definen el Hábitat (DIEZ, 2006b)

El macrohábitat dependerá de las variables temperatura, calidad del agua y estructura del canal, mientras que el microhábitat dependerá de la velocidad, el sustrato y la profundidad, encontrando como variable común el caudal existente en la zona.

Después de conocer y recolectar toda la información existente, ésta se introduce en un software (incluido en la metodología IFIM) que simula el hábitat disponible llamado PHABSIM, el cual se describe a continuación:

Software PHABSIM

PHABSIM (Physical Habitat Simulation System), es un modelo diseñado para el cálculo del índice de cantidad de microhábitats disponibles para las diferentes fases de la vida de la especie de estudio en los diferentes niveles de flujo. Este programa consta de dos componentes de análisis, una etapa hidráulica y una etapa de requerimiento del hábitat (información biológica) y emplea el siguiente procedimiento:

1. Con datos de terreno para un determinado caudal, se representa el río como un grupo de celdas.

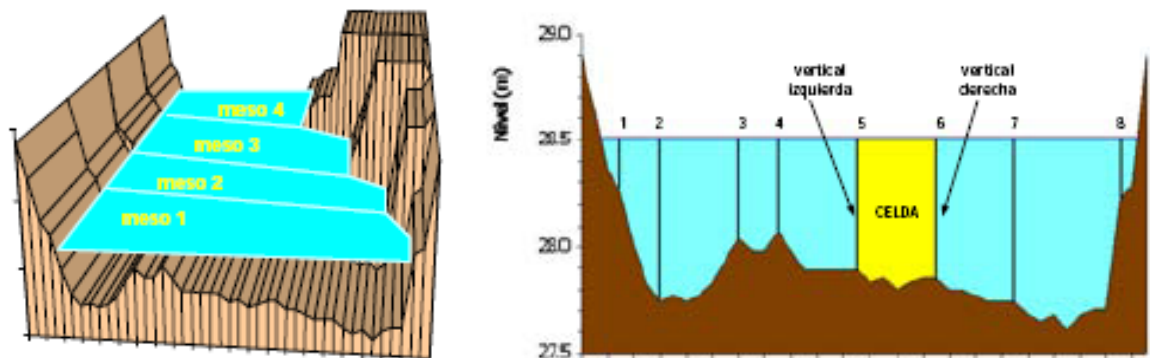


Imagen No. 7. Procedimiento PHABSIM (DIEZ, 2006b)

2. Cada celda tiene un valor único de las variables medidas para un caudal conocido (velocidad, profundidad, sustrato).

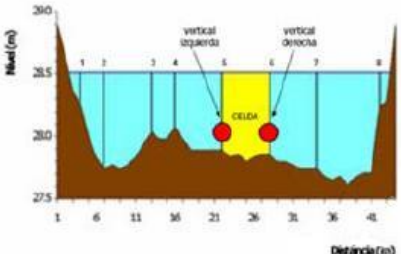
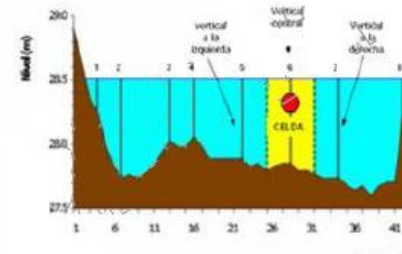
CELDA CENTRAL	CELDA CENTRADA
 <p data-bbox="532 554 769 583">Offset Cell. (Diez, 2006)</p>	 <p data-bbox="964 554 1201 583">Centered Cell. (Diez, 2006)</p>
<p data-bbox="472 621 829 651">Profundidad y Velocidad en la celda:</p> <p data-bbox="488 705 813 735">Media aritmética entre secciones.</p>	<p data-bbox="883 621 1300 684">Profundidad de la celda = $\frac{\text{Área de la celda}}{\text{Ancho de la celda}}$</p> <p data-bbox="891 716 1308 745">Velocidad en la celda = Velocidad medida.</p>
<p data-bbox="480 789 816 842">Método utilizado por los modelos: HABATE y HABEF</p>	<p data-bbox="932 789 1268 842">Método utilizado por los modelos: HABTAV y HABTAM</p>

Imagen No. 8. Cálculo por celdas del PHABSIM (DIEZ, 2006b)

3. Se deben conocer las preferencias de hábitat de la biota para cada una de las celdas (en base a información obtenida en el área, de acuerdo a la literatura o experiencia de profesionales). A esto se le conoce como curvas de preferencia.

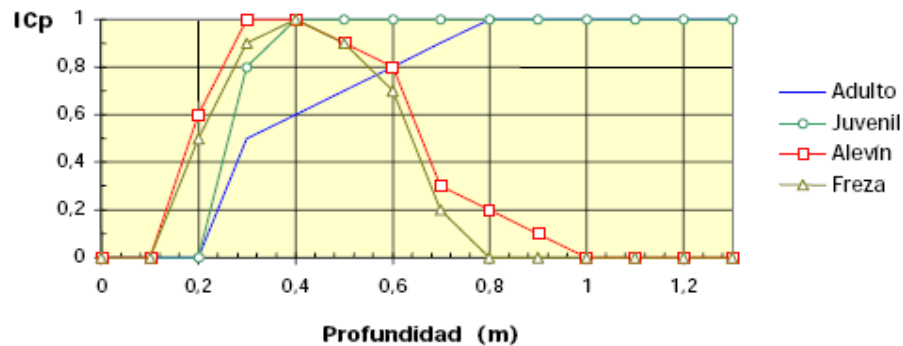


Imagen No. 9. Curvas de Preferencia PHABSIM (DIEZ, 2006b)

4. Con esta información se puede predecir el hábitat potencial de cada celda para diferentes caudales teóricos o simulados.

El programa pondera las áreas en forma de celdas, logrando así predecir las velocidades, profundidades y tipo de sustrato para cada celda, lo cual se puede unificar mediante el H4ábitat Ponderado que permite ver cómo cambian los valores de calidad del hábitat a diferentes caudales.

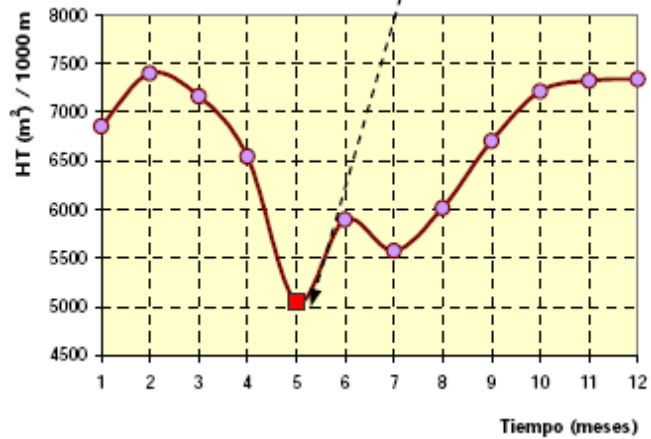
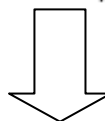
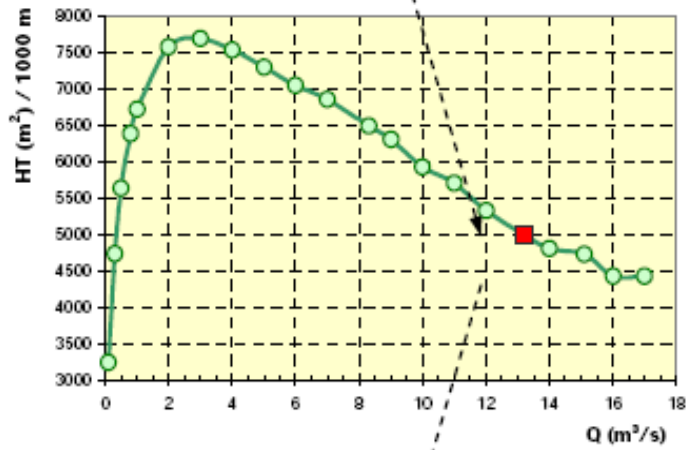
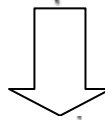
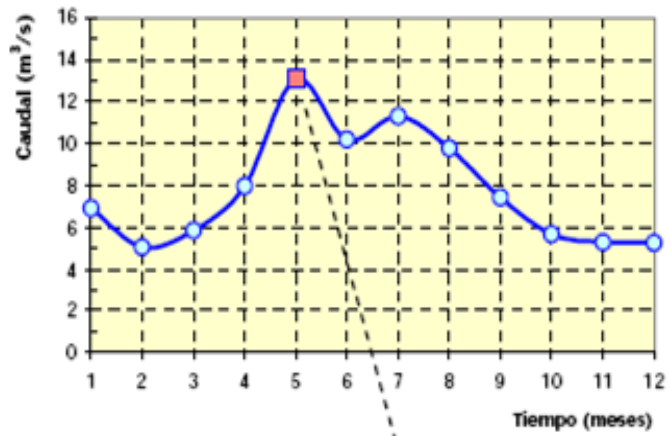


Imagen No. 10. Predicción Régimen de Caudales (DIEZ, 2006b)

El funcionamiento del software se sintetiza mediante el esquema de la Imagen 11, que muestra en forma de diagrama de bloques, el funcionamiento simplificado del PHABSIM.

La Imagen No. 12 muestra un esquema más detallado del PHABSIM, que incluye sus componentes, variables de entrada y de salida.

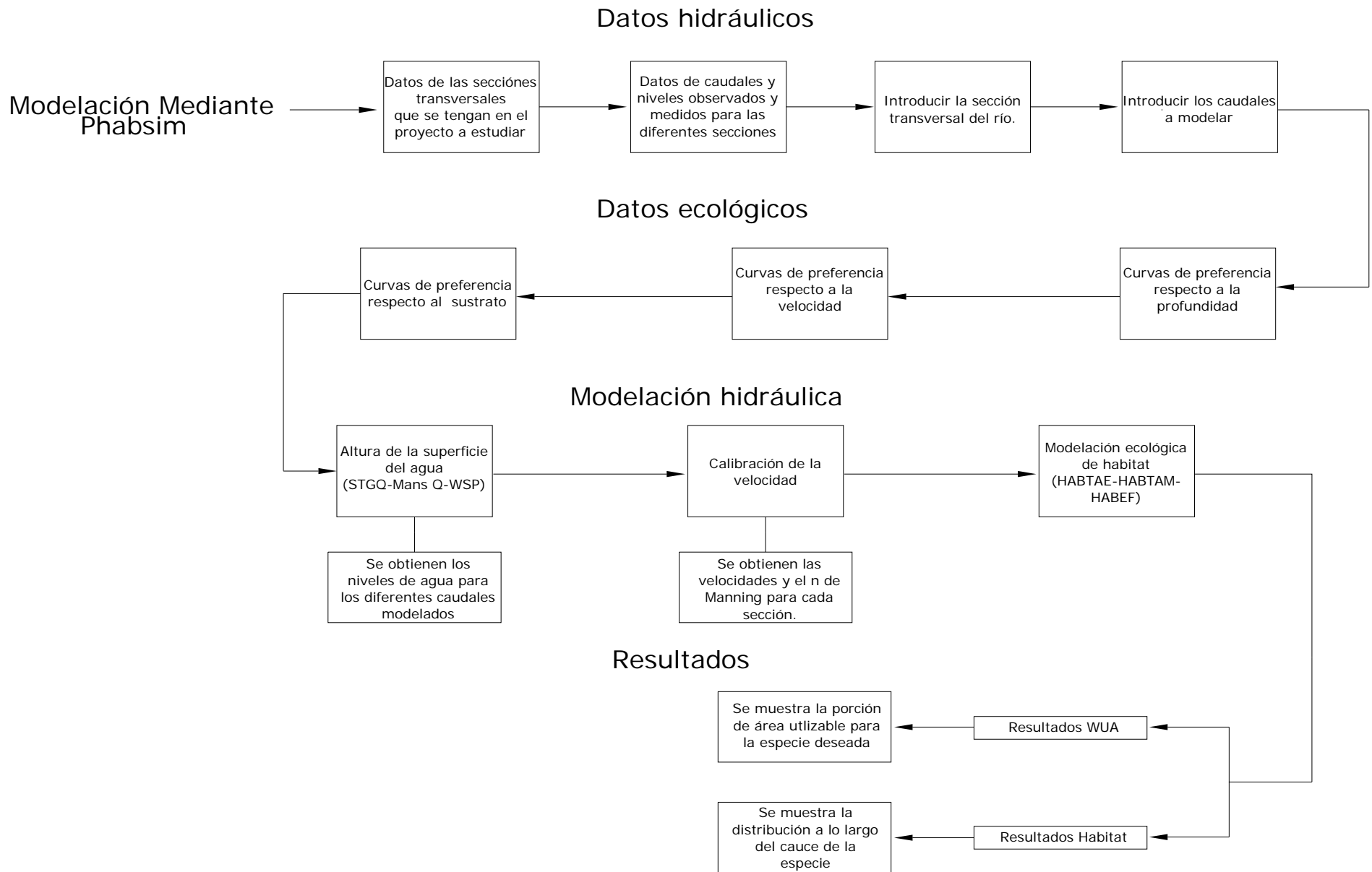


Imagen No. 11. Diagrama de Flujo Para el Uso del PHABSIM

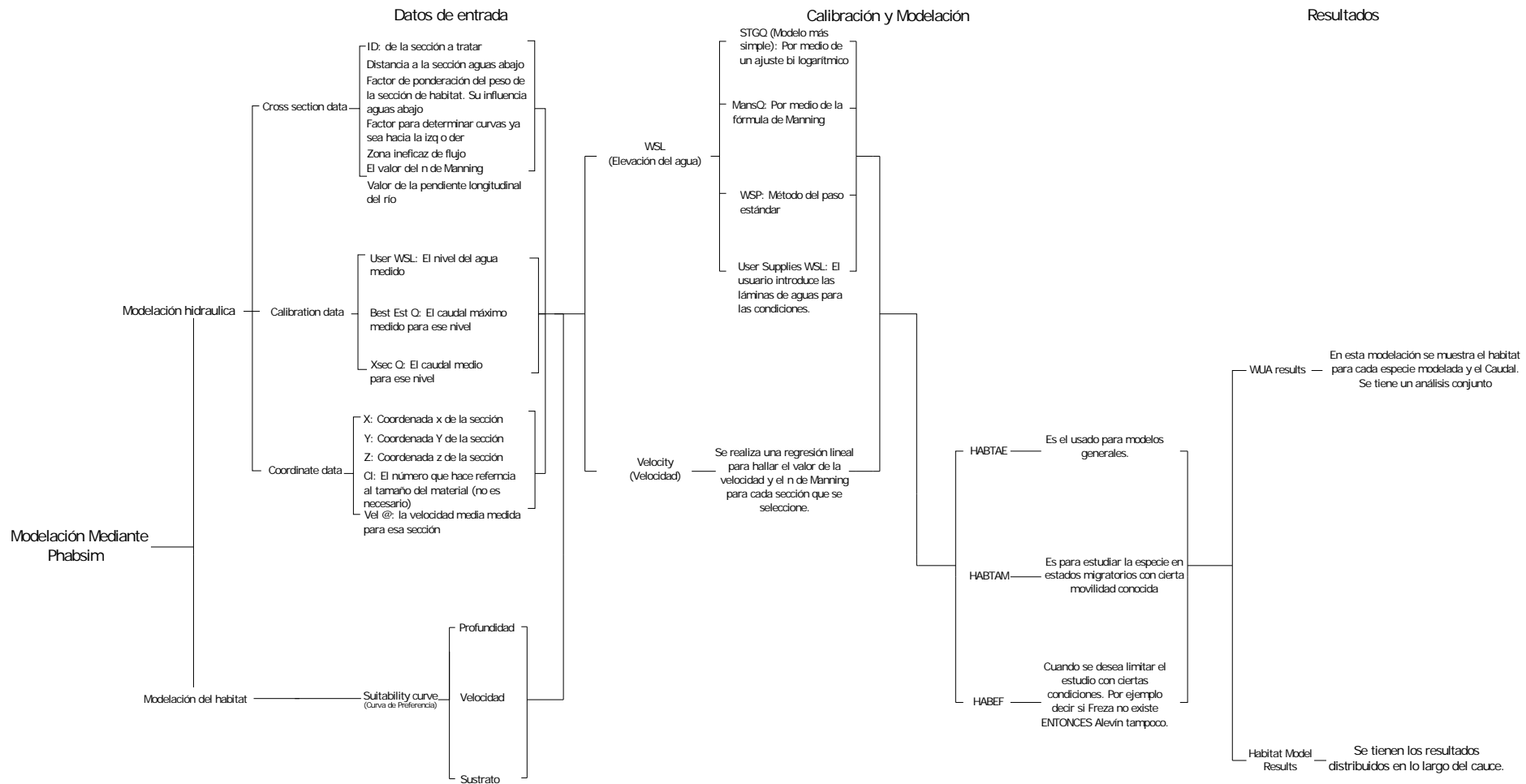


Imagen No. 12. Mapa Conceptual del Funcionamiento del Software

- IV. **Alternativa de Análisis:** Después de la modelación, calibración y verificación de los diferentes escenarios obtenidos, se comparan y se obtiene la mejor alternativa. Esta alternativa brindará la mejor opción de las partes incluidas en el proceso y se tendrá en cuenta su efectividad, su riesgo, su factibilidad técnica y económica, evaluado esto por un equipo multidisciplinario.
- V. **Resolución del Problema:** En este punto se tendrá en cuenta la recomendación del grupo interdisciplinario, en donde la decisión será la que tenga el mejor equilibrio entre todas las partes incluidas en el proceso.

3.3. CURVAS DE PREFERENCIA

Las curvas de preferencia son el resultado de parte de la recopilación de la información durante la fase de planificación y son aquellas que reproducen el grado de adecuación de un organismo respecto a los parámetros que determinan su hábitat físico (Diez, 2006a). Estos parámetros son de índole hidráulico como la velocidad y la profundidad, de índole físico como la temperatura y geotécnicos como el sustrato, aunque algunos autores (Yu y Peters, 1997) recomiendan tener en cuenta el número de Froude, la tensión atractiva en el lecho etc. Pero principalmente estas curvas se relacionan con velocidad, sustrato y profundidad.

Estas curvas se encuentran para diferentes especies de anfibios, mamíferos, aves, reptiles, crustáceos, moluscos (Hyra, 1978), pero para una mejor simplificación, algunos autores (Schlosser, 1982) recomiendan agruparlas en grupos que aprovechen el mismo tipo de recursos medio ambientales de igual manera.

Estas curvas presentan una forma univariable donde se relaciona la disponibilidad de hábitat con un valor máximo de 1 que representa el 100% respecto a la variación de las variables hidráulicas, físicas o geotécnicas (Ver Imagen No. 9).

Pero el aspecto que más ha suscitado crítica hacia el software PHABSIM, es el método de elaboración y utilización de las curvas, ya que se puede caer en subjetividades. Es por esto que algunos autores (Shirvell y Longard, 1987) recomiendan trabajar con curvas de preferencia universales que abarquen grupos de especies o utilizar curvas por tramo.

Para la medición de las diferentes variables necesarias en la construcción de las curvas se sigue el procedimiento que se muestra a continuación y que se tomó textualmente de Martínez y García, 2002:

“Profundidad y altura focal: La altura focal es la distancia sobre el lecho a la que se encuentra situado el pez, y a la cual se mide posteriormente la velocidad focal. Se estima en centímetros o como porcentaje del calado en el punto y, posteriormente (cuando se vuelve a pie), se mide en cm la longitud a que corresponde esta distancia, así como el calado total en el punto en cm. Esto se hace con una vara graduada y precisión de 1 cm, al igual que las medidas de calado que se hacen en los transectos y para conocer la distancia del punto a la orilla.

Velocidad y velocidad focal: En cada uno de los puntos escogidos por el pez se miden la velocidad focal y la media, mientras que en los transectos se mide solamente la velocidad media. Para ello se utiliza un aparato Valeport modelo BFM 002 (de precisión 0.01 m/s) y la velocidad media en la columna de agua se calcula del modo siguiente. Cuando el calado es mayor de 70 cm se mide la velocidad a dos profundidades iguales al 80% y 20 % del calado; el promedio de las dos medidas es la velocidad media de la columna de agua. Donde el calado es menor de 70 cm, se realiza una sola medición a una profundidad igual al 60% del calado en ese punto.

Tipos de Sustrato: Se ha estudiado según la clasificación granulométrica de la American Geophysical Union traducida del siguiente modo: Roca madre (Roca continua), Bloques (>1024 mm), Bolos (256-1024 mm), Cantos rodados (64- 256 mm), Gravas (8-64 mm), Gravillas (2-8 mm), Arenas (62 mm-2 mm) y Limo (< 62 mm). Para el uso del microhábitat se registra el sustrato dominante en un determinado radio alrededor del pez (Hampton & Aceituno, 1988), aproximadamente 15 cm. En los transectos de muestreo se toma el tipo de sustrato dominante en cada celda.

Refugio: Se toma nota de la presencia de elementos de cobertura (hasta una distancia máxima de 1m”).

Después de tomada la información se pasa al proceso de construcción de cada gráfica; para esto se debe muestrear el hábitat disponible del tramo, representando adecuadamente su heterogeneidad longitudinal (zonas de poza profunda, tablas, rápidos, etc.), de modo que los puntos de medición en cada uno reflejen la topografía del lecho y las condiciones hidráulicas de la sección tomada. A partir de estos datos se puede estudiar la presencia de zonas con distintas profundidades, velocidades, tipos de sustrato y disponibilidad de refugio que existen en el tramo de estudio. Esto es muy importante, ya que la preferencia del pez está en función del espectro ecológico de la especie y del hábitat disponible. Luego se asigna un peso porcentual llamado i a cada punto de control en función de la longitud total; posteriormente se calcula una frecuencia F_j para cada clase j en que se ha dividido todo el rango de valores del parámetro (sustrato, velocidad, profundidad); con esta frecuencia se calcula un índice de disponibilidad para cada intervalo j del parámetro y este índice de disponibilidad consiste en el cociente entre la frecuencia ponderada de la clase F_j y la suma de las frecuencias ponderadas de todas las clases, normalizando la curva entre 0 y 1, es decir:

$$I_{dj} = \frac{f_j}{\sum_j f_j}$$

Por otra parte, se calcula el uso del microhábitat por parte de los peces, se utiliza un Índice de Uso para cada clase j del parámetro, definido como:

$$I_{uj} = \frac{\text{\# de individuos asociado a cada clase } j}{\text{\# total de la clase } j}$$

Ahora para obtener la curva de preferencia se pondera el uso del hábitat con el hábitat disponible en cada tramo, dividiendo el uso del hábitat con el hábitat disponible así:

$$I_{dj} = \frac{I_{uj}}{I_{dj}}$$

3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad consiste en variar un conjunto de variables y determinar qué tanto afecta esta variación el resultado final. Este trabajo se realizará específicamente mediante el siguiente método.

Variación Paramétrica: Consiste en analizar cómo cambia la solución cuando se efectúan cambios continuos en uno o más parámetros.

El procedimiento para llevar a cabo el análisis de sensibilidad paramétrica es el siguiente:

1. Calcular la solución para los parámetros base.
2. Determinar el rango de valores para los que la solución sigue siendo válida, a un cambio en los parámetros.
3. Generar una variación en los parámetros, a partir de los cuales se obtiene una nueva solución.
4. Determinar la diferencia entre los resultados de la curva base y los resultados hallados por medio de la curva variada.
5. Hallar el error porcentual entre los resultados de los parámetros base y los parámetros variados.
6. Generar una nueva variación en la curva y repetir pasos 3, 4 y 5.

Ejemplo:

Se tiene la siguiente ecuación de una recta:

$$Y=3+2*X$$

En un intervalo de 0 a 5. De lo cual se obtiene la siguiente gráfica como resultado:

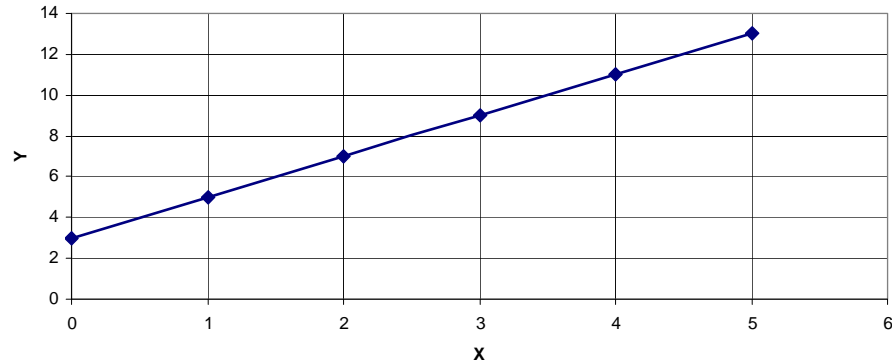


Gráfico No. 1. Curva base ejemplo análisis de sensibilidad

Si se varía el parámetro b de la recta en un 20%, se va a obtener la siguiente recta:

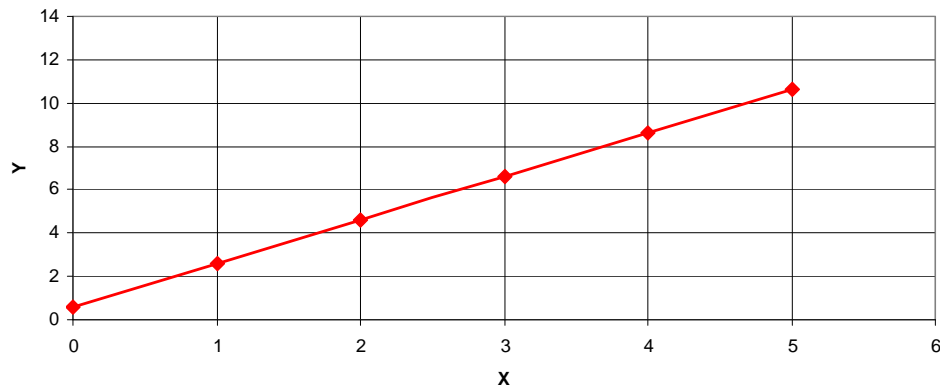


Gráfico No. 2. Curva variada ejemplo análisis de sensibilidad

Al comparar ambas rectas tomando la recta inicial como la recta base, se encuentra la siguiente gráfica:

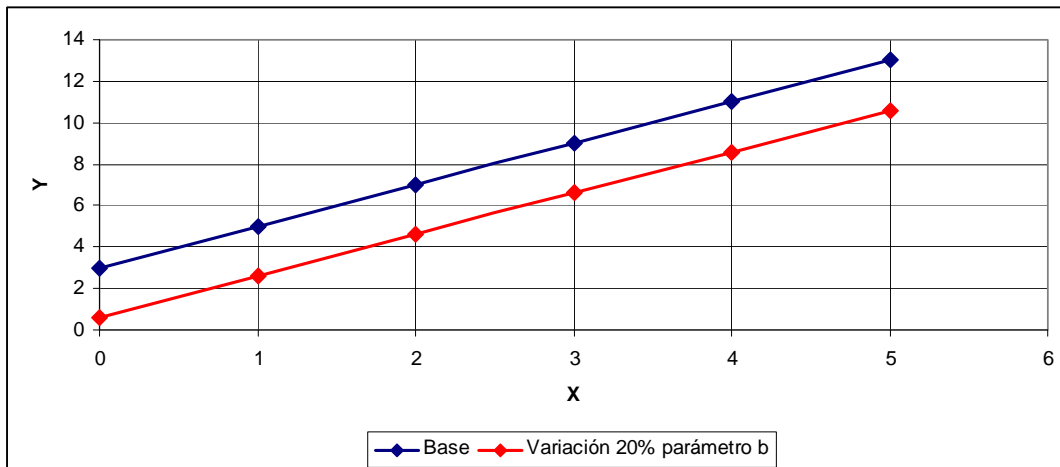


Gráfico No. 3. Curva base y variada ejemplo análisis de sensibilidad

Al comparar ambas gráficas punto a punto dentro del intervalo establecido, se puede establecer la sensibilidad de esta recta a la variación del parámetro b. A continuación se muestra la variación de la curva de forma porcentual punto a punto:

X	Y (Base)	Y (Variada)	% de Variación
0	3	0.6	0.80
1	5	2.6	0.48
2	7	4.6	0.34
3	9	6.6	0.27
4	11	8.6	0.22
5	13	10.6	0.18

Al observar los resultados en este ejemplo se puede establecer que a mayor valor de X, el error porcentual entre la curva base y la curva variada es menor. Teniendo en cuenta el ejemplo anterior se puede determinar la sensibilidad de la recta a partir de una variación del parámetro b.

Específicamente para esta investigación, con este procedimiento se pretende variar los parámetros ecológicos (en este caso las curvas de preferencia), para verificar qué tanta diferencia se produce entre la curva original de Caudal vs. Hábitat (curva base o sin modificaciones en sus parámetros) y las nuevas curvas Caudal vs. Hábitat, producto de las modificaciones.

3.5. MARCO LEGAL Y NORMATIVO PARA COLOMBIA

En Colombia la normatividad respecto a los caudales ecológicos es poco precisa o limitada por no decir que inexistente. Existe muy poca normatividad referente al tema. A continuación se hace referencia a las normas existentes para Colombia en cuanto al concepto de caudales ecológicos.

Entre la normatividad existente se encuentra el proyecto de ley 365 de 2005 titulado como “Proyecto De Ley Del Agua” (Nancy, 2005), el cual nombra las directrices para la determinación de caudales ecológicos y establece que las autoridades ambientales deben fijar dicho caudal con base en estudios técnicos. En este proyecto de ley se hace referencia a los caudales ecológicos más específicamente en el artículo 21 el cual se cita textualmente a continuación:

Artículo 21. Caudal ecológico de las corrientes superficiales. Entiéndese por caudal ecológico de las corrientes superficiales los caudales mínimos que, de acuerdo con los regímenes hidrológicos, deberán mantener las corrientes superficiales en sus diferentes tramos, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y de los ecosistemas asociados.

El caudal ecológico para cada corriente superficial o tramo de la misma será establecido por las autoridades ambientales competentes, de acuerdo con los lineamientos técnicos que para el efecto establezca el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Hasta tanto se establezcan los lineamientos a que se refiere este artículo, se considerará como tal el caudal de permanencia en la fuente durante el 90% del tiempo, sin perjuicio de que se respeten los derechos adquiridos mediante concesiones vigentes.

A parte de este proyecto de ley para la regulación de los caudales ecológicos, se tiene la Resolución 865 (MAVDT, 2004), en la cual se habla del caudal ecológico como un factor de reducción para la cuantificación de la oferta hídrica neta disponible en el índice de escasez. Esto se especifica en el numeral 3.4.2 de la resolución en cuestión, y a continuación se cita textualmente:

El caudal mínimo, ecológico o caudal mínimo remanente es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna de una corriente de agua. Existen diversas metodologías para conocer los caudales ecológicos:

Hidrológicas. Se basan en el comportamiento de los caudales en los sitios de interés, para lo cual es necesario el conocimiento de series históricas de caudales.

Hidráulicas. Consideran la conservación del funcionamiento o dinámica del ecosistema fluvial a lo largo de la distribución longitudinal del río, es decir que el caudal de reserva que se deje en los distintos tramos permita que el río siga comportándose como tal.

Simulación de los hábitats. Estiman el caudal necesario para la supervivencia de una especie en cierto estado de desarrollo.

Mínimo histórico: El Estudio Nacional del Agua (2.000) a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5% del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años.

Porcentaje de Descuento: el IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

La autoridad ambiental debe escoger entre las anteriores metodologías de acuerdo con la información disponible y las características regionales particulares.

Como se puede observar, no existe una normatividad elaborada para la determinación de caudales ecológicos en Colombia. Lo más parecido es la resolución 865 de 2004 que no es una normatividad como tal de caudales ecológicos, pero se ha adoptado así debido a la inexistencia de la misma.

Lo último que se ha presentado en Colombia respecto al tema, es un taller realizado en Octubre de 2008 por varias entidades nacionales comandadas por la Universidad Nacional y el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual tenía como objetivo divulgar una metodología para la determinación de caudales ecológicos creada y desarrollada por la Universidad Nacional de Colombia. Esta metodología calcula preliminarmente el valor de los Caudales Ecológicos mediante una aplicación compatible con Excel, la cual permite realizar la evaluación por medio de datos hidrológicos o datos hidráulicos, mezclándolos con índices de calidad del recurso hídrico para la sostenibilidad del medio ambiente. En esta metodología se tiene como primer paso calcular el valor del régimen de caudales ecológicos, posterior a esto se revisa desde el punto de vista hidráulico, de calidad del agua y ecológico.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la metodología que se siguió para alcanzar los objetivos propuestos.

Es importante recordar que este proyecto se encuentra enmarcado dentro del protocolo de modelación que se maneja en Ingeniería, el cual se basa en 7 etapas principalmente, que se nombran a continuación: 1) Sistema de Información, 2) Desarrollo del Modelo Conceptual, 3) Desarrollo del Modelo Matemático, 4) Desarrollo del Aplicativo Computacional, 5) Calibración y Validación de los modelos, 6) Creación de Escenarios y 7) Simulación. Este proyecto se encuentra enmarcado entre las etapas 5 y 6, donde se ubica una sub-etapa que se refiere al análisis de sensibilidad. Para un mayor entendimiento de protocolo de modelación ver el artículo “Procesos de Análisis en Ingeniería como Estrategia para la Profesionalización del Docente-Ingeniero” (OBREGÓN , 2008).

PROTOCOLO DE MODELACIÓN EN INGENIERÍA

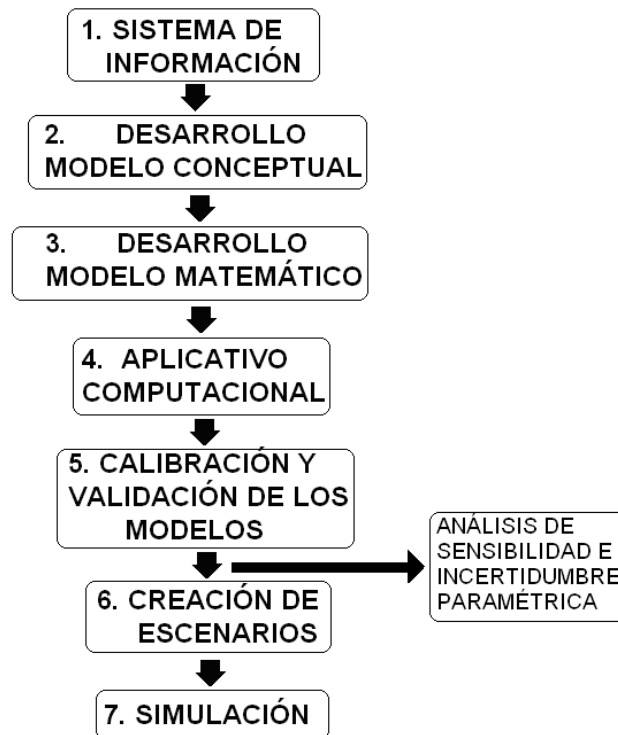


Imagen No. 13. Esquema del Protocolo de Modelación en Ingeniería

Este proyecto, como se nombró anteriormente, se centra en las etapas 5 y 6 del protocolo de modelación en Ingeniería, sin embargo, cabe anotar que en el

desarrollo del proyecto también se tuvieron en cuenta las otras etapas del protocolo, aunque con un menor rigor.

La metodología que se empleó específicamente para este proyecto, se divide en tres etapas: la primera corresponde a un apropiamiento del conocimiento, la segunda etapa es un proceso de filtración de la información y la última etapa es el análisis de sensibilidad propiamente dicho.

A continuación se presenta el esquema de la metodología empleada específicamente para esta investigación.

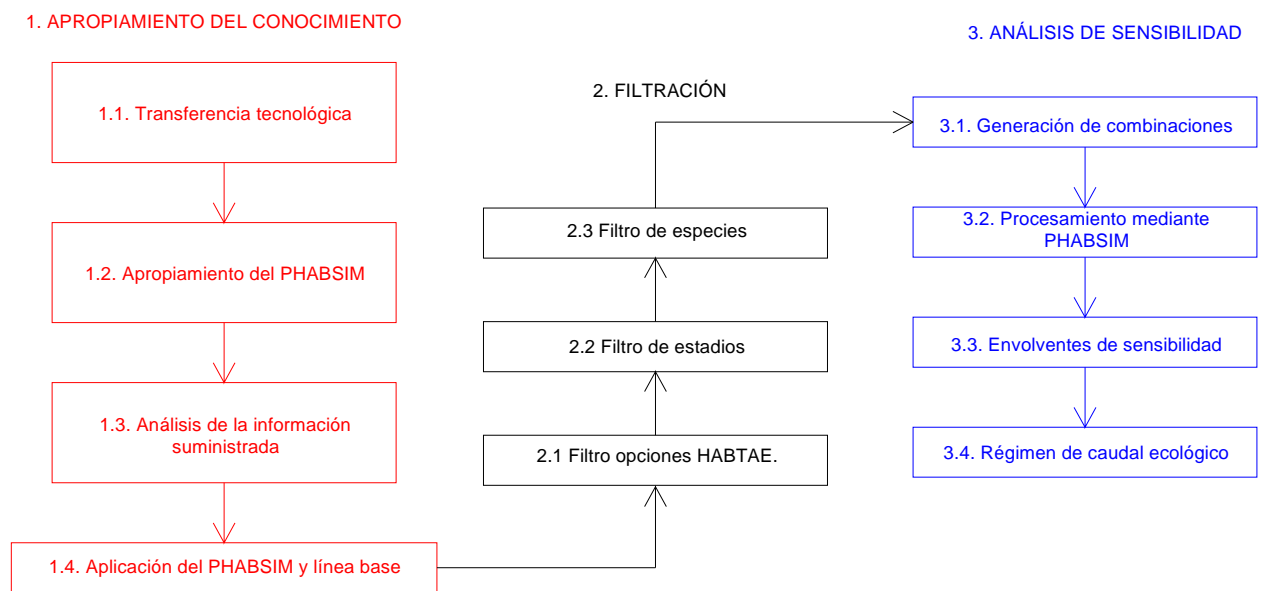


Imagen No. 14. Esquema de la Metodología empleada en esta investigación.

4.1. APROPIAMIENTO DEL CONOCIMIENTO

Al realizar esta primera fase de la metodología, se pretenden dos objetivos principales: el primero es lograr un buen manejo del Software PHABSIM y el segundo tiene que ver con el análisis y procesamiento de la información suministrada por el codirector del proyecto, Ing. Juan Manuel Diez, que sirve de insumo para la siguiente fase.

4.1.1. Transferencia tecnológica

Esta actividad consistió fundamentalmente en apropiarse de la metodología IFIM, específicamente del software PHABSIM, mediante un curso de 2 días realizado en la Pontificia Universidad Javeriana, para la materia Ecohidrología y Ecohidráulica de la Maestría en Hidrosistemas. Este curso fue dictado por el Doctor Juan Manuel Diez Hernández, codirector de este proyecto y en él se trataron inicialmente las fases de la metodología IFIM y luego se hizo énfasis en el software PHABSIM, en la entrada de datos hidráulicos y ecológicos y los tipos de modelos que posee el software (ecológicos e hidráulicos). También se tocó el tema de la normatividad de caudales ecológicos en Colombia.

4.1.2. Apropriamiento del PHABSIM

En esta etapa se logró un entendimiento más profundo del PHABSIM mediante el desarrollo de un ejemplo guía, que quedó documentado en los anexos de este documento. Para la realización de este ejemplo y del anexo se tuvo como principal herramienta el manual del usuario del software para entender mejor el funcionamiento interno del mismo, tal como son las ecuaciones y procedimientos que utiliza el software para la solución de los diferentes modelos. Este ejemplo se comenzó desde la entrada de datos hasta llegar a la simulación hidráulica y ecológica para finalmente obtener las curvas de caudal vs. Hábitat (Ver Anexo No. 1).

4.1.3. Análisis de la información suministrada

El codirector del proyecto, Dr. Juan Manuel Diez, suministró la información de un hidrosistema español, que incluyó los aspectos generales del proyecto, serie de caudales del río estudiado, levantamientos batimétricos del tramo en estudio, aforos de caudal líquido en diferentes secciones y las curvas de preferencia de tres especies diferentes.

Inicialmente se realizó un análisis a la serie histórica de caudales para poder determinar que tipo de régimen hidrológico presenta el cauce de estudio y los caudales que se deben modelar mediante el PHABSIM. En segundo lugar se revisó la información suministrada y se preparó adecuadamente para la siguiente actividad.

Es importante tener en cuenta que las curvas de preferencia suministradas corresponden a tres estadios⁴ de tres especies representativas del ecosistema. Las especies son: *Barbus Bocagei* (Nombre común Barbo), *Chondrostoma Polyepis* (Nombre común Boga de río) y *Squalius Pyrenaicus* (Nombre común Cacho).

4.1.4. Aplicación del PHABSIM y línea base:

Esta actividad consistió básicamente en procesar toda la información que se preparó en la etapa anterior mediante el software PHABSIM, con el fin de obtener las curvas de caudal vs. Hábitat de cada estadio y de cada especie. Para poder llegar a este objetivo se tuvieron que introducir todos los datos requeridos por el programa para generar el modelo tales como: la morfología del río (secciones transversales y perfil longitudinal del cauce), las curvas de preferencia, los niveles y caudales medidos para generar la calibración hidráulica requerida por el programa y finalmente generar las simulaciones hidráulicas y ecológicas deseadas, con el fin obtener las curvas de Caudal vs Hábitat. Estos resultados son el insumo para las fases siguientes de la metodología.

Es importante agregar que dentro de esta fase se calibró el modelo hidráulico y se simularon aproximadamente 17 caudales. En la calibración ecológica se escogió el modelo HABTAE por ser el más convencional y utilizado en el mundo. Los otros dos modelos, HABTAM y HABEF, se descartaron porque el primero requiere conocimiento acerca de los estados migratorios de las especies, información que no se tenía, y el segundo requiere la introducción de las relaciones existentes entre las especies y los estadios, información que tampoco se posee. Adicionalmente, se escogió el modelo HABTAE porque su implementación en ecosistemas colombianos es más factible, por lo menos, en primeras aproximaciones.

4.2. FILTRACIÓN

A partir del análisis realizado en la primera fase y de la comparación de los diferentes resultados, en esta fase se aplicaron diferentes tipos de filtros con el fin de obtener un estadio y una especie representativa para hacer el análisis de sensibilidad. También se realizó un filtro para escoger qué opción, dentro del modelo HABTAE, es más crítica.

⁴ Estadio: es la edad en que se encuentra un pez. Existen cuatro estadios principales que son Freza (pez recién nacido), Alevín (pez niño), Juvenil y Adulto. En este proyecto se analizaron los 3 últimos.

4.2.1. Filtro opciones HABTAE

Esta primera actividad se relaciona con la escogencia de una de tres opciones con las que cuenta el modelo HABTAE, mediante un análisis de los resultados obtenidos a partir de estas tres opciones. El criterio para esta selección, consistió en escoger la opción que menos hábitat arrojara en los resultados finales, es decir, la condición más crítica para los tres estadios de las tres especies analizadas. Para realizar esto se corrieron todas las especies y todos los estadios, con los tres modelos, para poder comparar cual de los tres modelos presentaba el menor hábitat.

Específicamente las opciones con las que cuenta el modelo ecológico HABTAE son: “standar calculation”, “geometric mean” y “lowest factor” (estas opciones se encuentran explicadas en la guía de usuario en el Anexo No. 1 Página No. 18).

4.2.2. Filtro de estadios

Esta actividad consistió en llevar a cabo un análisis de semejanza entre las formas y magnitudes de las curvas de preferencia de los diferentes estadios y de las diferentes especies, con el fin de escoger el estadio que menos variara en relación a las diferentes especies. Para realizar esto se graficaron los estadios de cada especie con el fin de hallar los que mayor similitud presentaran entre sí. Esta similitud se situó básicamente en la forma de las curvas, es decir que sus formas fueran parecidas, que el cambio que sufrieran fuera porque son más amplias ó se encuentren desfasadas, pero que guarden una proporción o forma básica entre sí.

4.2.3. Filtro de especies

Finalmente se efectuó un análisis de sensibilidad preliminar variando las curvas de preferencia del estadio escogido en la etapa anterior para las tres especies, con el fin de determinar qué especie arrojaba mayores errores en los resultados, es decir, qué especie es más sensible en términos de hábitat y en función de una variación paramétrica. Al estadio escogido en el paso anterior se le realizaron dos variaciones, una de 1% y otra de 2% hacia arriba con el fin de determinar qué especie sufría una mayor variación frente a un cambio en sus curvas de preferencia. La especie que sufría la mayor variación sería la escogida para realizar el análisis de sensibilidad definitivo. Esto debido a que al ser la especie que sufre la mayor variación, sería la especie crítica y que mayor sensibilidad va a presentar ante cualquier cambio, por lo cual es la que mejor se presta para observar el comportamiento del software ante cualquier tipo de variación.

4.3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Con base en los filtros desarrollados anteriormente, en esta fase se procedió inicialmente a obtener las combinaciones para efectuar posteriormente el análisis de sensibilidad. Para esto, se tuvieron en cuenta las siguientes actividades.

4.3.1. Generación de combinaciones.

Una vez escogida la especie y el estadio de análisis, se procedió a generar las combinaciones para efectuar el análisis de sensibilidad. Este proceso consistió en desplazar las 3 curvas de preferencia (del estadio y la especie escogida) de manera simultánea, teniendo en cuenta 7 variaciones porcentuales (-10%, -5%, -1%, 0%, 1%, 5% y 10%). Con la combinación de estas variaciones se obtienen 343 variaciones posibles en las curvas de preferencia, lo cual resulta de combinar simultáneamente los diversos porcentajes en los cuales varían las curvas de preferencia con los tres tipos de curvas simultáneamente.

4.3.2. Procesamiento mediante PHABSIM

En esta actividad se procesaron las diferentes combinaciones generadas anteriormente y se guardaron los resultados correspondientes (curvas de Caudal vs. Hábitat). Para esto se introdujeron todas las variaciones de las curvas de preferencia con sus diferentes combinaciones en el software y se obtuvieron los resultados correspondientes.

Este procedimiento se intentó realizar de manera automatizada por medio de la creación de un usuario virtual, pero el software PHABSIM no tiene una compatibilidad con la importación de datos desde otros programas en su lenguaje, razón por la cual fue necesario efectuarlo manualmente.

4.3.3. Envoltentes de sensibilidad

En esta fase se agruparon los resultados de acuerdo a las franjas de variación porcentual escogidas en la etapa 4.3.1 con el fin de obtener las diferentes envoltentes de sensibilidad. Es decir, se agruparon todas las variaciones que se encontraban entre -0.01 y +0.01, las variaciones entre -0.05 y +0.05 que incluían las de -0.01 y +0.01 y por último, se agruparon las variaciones entre -0.10 y +0.10. En esta última envoltente se encuentran incluidas las otras dos. Adicionalmente se analizaron las tendencias de los errores promedios y máximos en función de las variaciones porcentuales de las curvas de preferencia, es decir, de la incertidumbre paramétrica.

4.3.4. Régimen de caudal ecológico

Finalmente, con base en las franjas de sensibilidad obtenidas en función de la incertidumbre paramétrica de las variables ecológicas, en esta etapa de la metodología se planteó un régimen de caudales ecológicos con sus respectivas bandas de confianza. En esta etapa de la metodología IFIM originalmente se debe realizar una negociación entre las diferentes partes que se involucran en el proyecto. Debido a que en este caso no se tenían estas partes o actores, para fines de realizar el proyecto se supuso que un 75% del caudal medio mensual sería adecuado para preservar el ecosistema. Partiendo de esta suposición, se halló el caudal correspondiente al 75% del caudal promedio mensual de cada mes y se proyectó en la curva de Hábitat vs Tiempo.

Después de realizar esta proyección y a partir de los porcentajes de errores hallados para cada porción de hábitat, se generó una envolvente con los errores positivos y negativos en esta curva (Hábitat vs Tiempo), interpolando linealmente los valores que fueran necesarios, de acuerdo a los hallados en el numeral 4.3.3 (la franja de incertidumbre se halló para la envolvente correspondiente a -0.10 y 0.10).

Posterior a esto se proyectó la franja de incertidumbre de porción de hábitat encontrada anteriormente en la gráfica de caudal, para así obtener la banda de confianza (envolvente) para la serie de caudales medios mensuales.

5. RESULTADOS

Este capítulo pretende mostrar los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita anteriormente. Los resultados serán descritos en el mismo orden en que se describió la metodología.

5.1. APROPIAMIENTO DEL CONOCIMIENTO

5.1.1. Transferencia tecnológica

Gracias al taller acerca de la metodología IFIM, se tuvo un primer acercamiento al manejo del software PHABSIM mediante la aplicación de un ejemplo. Mediante la consulta del tutorial se conocieron los diferentes procesos para la obtención de regímenes de caudales ecológicos. En gran parte del taller se hizo énfasis en el conocimiento de las variables de hábitat, más exactamente las curvas de preferencia de las especies, punto en el cual se aprendió el proceso de construcción de las mismas y también su importancia para la asignación del régimen de caudales ecológicos.

5.1.2. Apropiamiento del PHABSIM

Después de este primer acercamiento a la metodología IFIM y al software PHABSIM se elaboró una guía (ver Anexo No. 1) para el adecuado manejo del programa.

5.1.3. Análisis de la información suministrada

A partir del análisis realizado a la zona del proyecto se pudieron determinar las siguientes características:

El proyecto se sitúa en España, en la Cuenca del Tajo. El río al que se le realiza el estudio es el río Bornova, en un tramo que se encuentra comprendido entre el embalse Alcorlo y la confluencia con el río Henares. En el Anexo No. 2 se encuentra un documento que muestra las características generales del proyecto y su ubicación. Se encontró que el caudal medio mensual es igual a $2.118 \text{ m}^3/\text{s}$ (los datos para este cálculo se encuentran en el Anexo No. 2) y su pendiente media es de 0.0129 m/m . La longitud del tramo de estudio es de 225 metros y se encuentra a una altura media de 725 m.s.n.m. Las secciones transversales presentan un ancho promedio de 16 metros. Casi toda la longitud del tramo de estudio se encuentra conformada por rápidos, sólo se encuentran remansos en las secciones 8 y 11 del modelo.

Para el análisis de la serie de caudales se procesaron los datos suministrados y se generó la serie de histórica caudales que se muestra en la Figura No. 1.

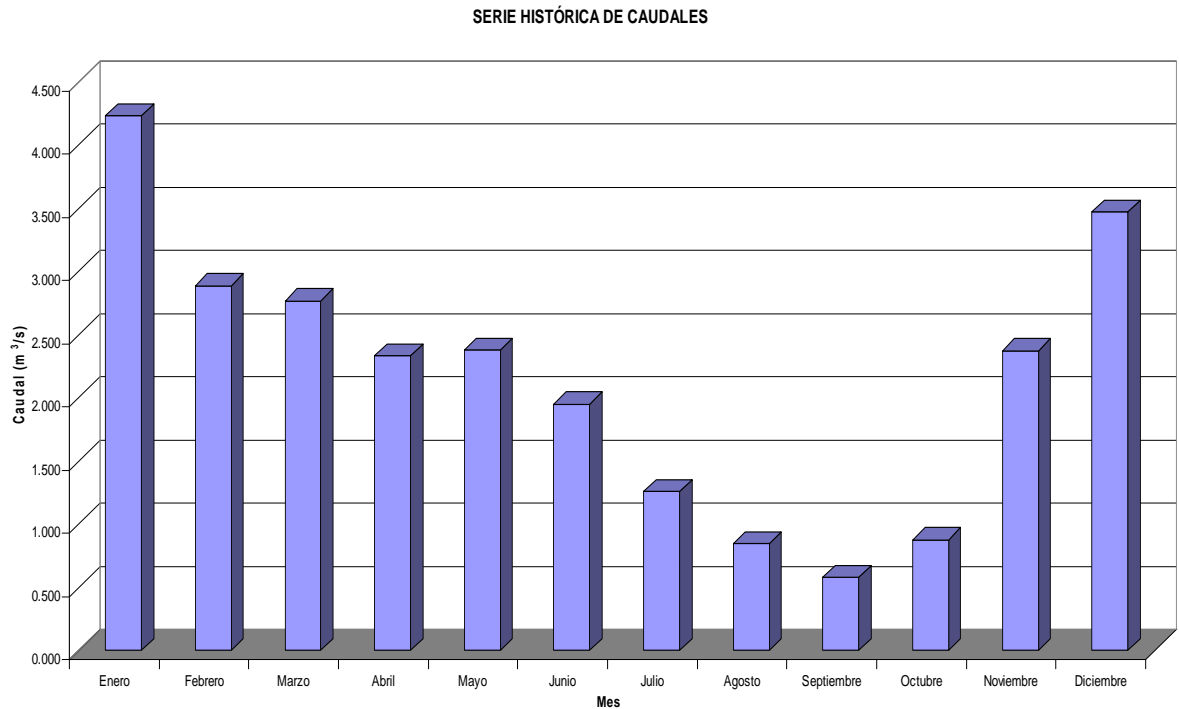


Figura No. 1. Serie histórica de caudales.

Al observar esta serie se determina fácilmente que en la zona de estudio se presenta un comportamiento hidrológico de tipo monomodal, debido a que en el año se tiene una sola época seca que corresponde a los meses de julio a octubre, y una época húmeda que corresponde a los meses de noviembre a junio. Al observar la serie de caudales obtenida se distingue a septiembre como el mes más seco, presentando un caudal promedio de $0.581 \text{ m}^3/\text{s}$. Mientras que Enero es el mes más húmedo y presenta un caudal de $4.23 \text{ m}^3/\text{s}$. En la serie histórica de caudales se producen caudales ascendentes entre los meses de octubre a enero mientras que se producen caudales descendentes entre los meses de enero a septiembre.

A partir del rango de caudales medios que se presentan en la zona de estudio se consideró adecuado modelar 15 caudales diferentes que se encuentran entre $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $3.80 \text{ m}^3/\text{s}$. El límite de $3.80 \text{ m}^3/\text{s}$ se decidió debido a que según las descripciones encontradas de las especies en estudio (Ver Anexo No. 2), se decía que éstas tienen preferencia por velocidades y niveles altos, por lo tanto los casos más críticos se presentan cuando los caudales son más bajos.

5.1.4. Aplicación del PHABSIM y línea base

Posterior al procesamiento de la información suministrada para el proyecto se generó el modelo en PHABSIM.

Como se propuso en los objetivos de este proyecto, se aplicó el PHABSIM a un hidrosistema cualquiera. Debido a que en este caso se utilizaron datos de un proyecto real, no fue necesario generar las curvas de preferencia mediante la simulación de Montecarlo.

Respecto a la modelación hidráulica el modelo se realizó como se describió en la metodología y produjo el perfil que se muestra en la Imagen No. 14. En el perfil se está mostrando el caudal del cual se tenían las mediciones y con el cual se calibró el modelo. Como se puede observar, la lámina de agua producida por la simulación es casi igual que la producida por los niveles medidos. Debido a esto el modelo hidráulico se considera apropiado.

Discharges

0.20
0.30
0.50
0.70
0.90

All On/Off

Thalweg
 Observed WSL
 Simulated WSL

Grid Lines

Close
Print
Refresh

Longitudinal Profile
Simulated WSL, Observed WSL, Thalweg

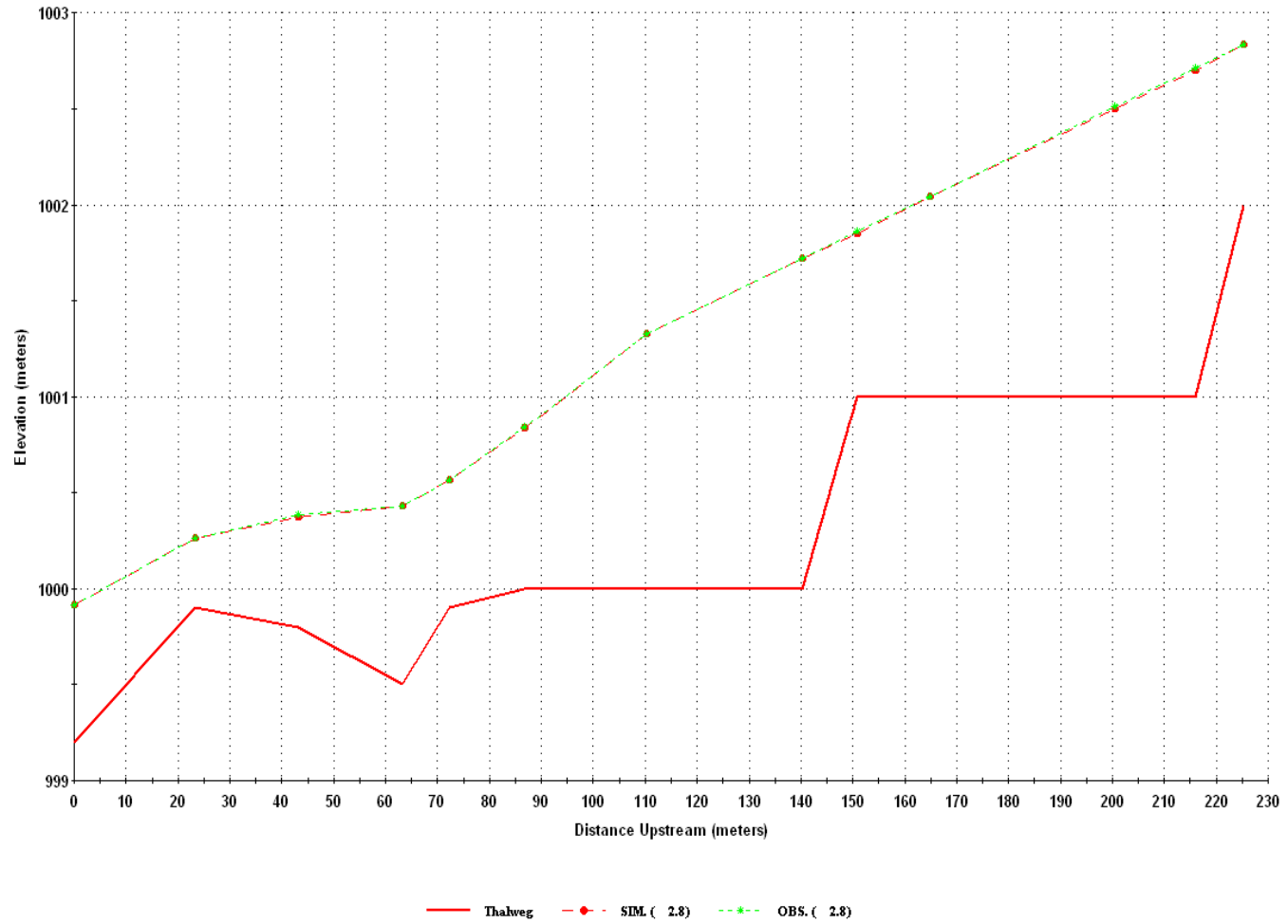


Imagen No. 15. Perfil longitudinal del río.

Respecto a la modelación de hábitat se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se muestran de manera conjunta para cada especie con sus diferentes estadios de desarrollo (adulto, juvenil, alevín).

- a. A continuación se muestran las curvas de la especie *Barbus Bocagei* obtenidas después de la simulación:

BARBUS BOCAGEI

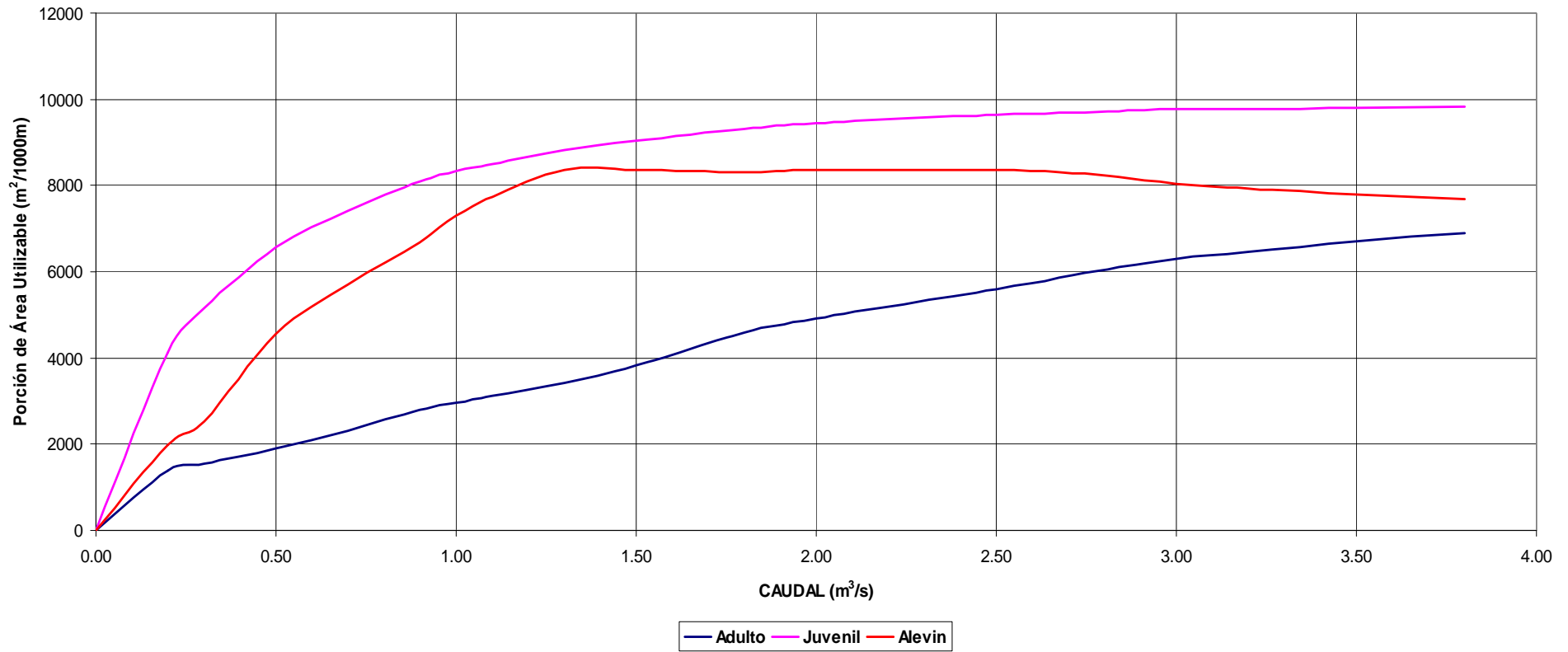


Figura No. 2. Hábitat vs. Caudal - Barbus Bogaei

En la Figura No. 2 se muestra la porción de hábitat expresada en $\text{m}^2/1000\text{m}$ y el caudal expresado en m^3/s de la especie *BARBUS BOGAGEI* en sus diferentes etapas de desarrollo. Se puede observar cómo en su estado juvenil y alevín, en el rango de caudales comprendidos entre 0.00 y 1.00 m^3/s , la disponibilidad de hábitat crece en una forma acelerada con respecto al caudal, mientras que en la etapa adulto la disponibilidad de área aumenta con una pendiente menos pronunciada respecto a la descarga.

En la gráfica se distingue claramente cómo las etapas juvenil y alevín requieren la misma descarga para una disponibilidad de hábitat similar. Caso contrario a lo que sucede con su etapa adulta, en donde la disponibilidad de área crece de manera constante con el caudal. Se obtiene un punto de inflexión en las etapas juvenil y alevín cercano a 1,50 m^3/s , luego de este caudal se nota un comportamiento asintótico para la etapa juvenil y un decrecimiento del hábitat respecto al caudal en la etapa alevín, que para caudales altos tendrá valores de hábitat similares a los de la etapa adulta.

A partir de este comportamiento se puede decir que caudales mayores son favorables tanto para la etapa juvenil como para la etapa adulta, mientras que para la etapa alevín son recomendables caudales del orden de 1 a 1.5 m^3/s . Es decir que en los meses de noviembre a abril se tienen caudales para el desarrollo óptimo de los estadios juvenil y adulto, mientras que en los meses de julio a octubre se producen caudales propicios para el desarrollo del estadio alevín.

- b. A continuación se muestran las curvas de la especie *Squalius Pirenaycus* obtenidas después de la simulación:

SQUALIUS PIRENAYCUS

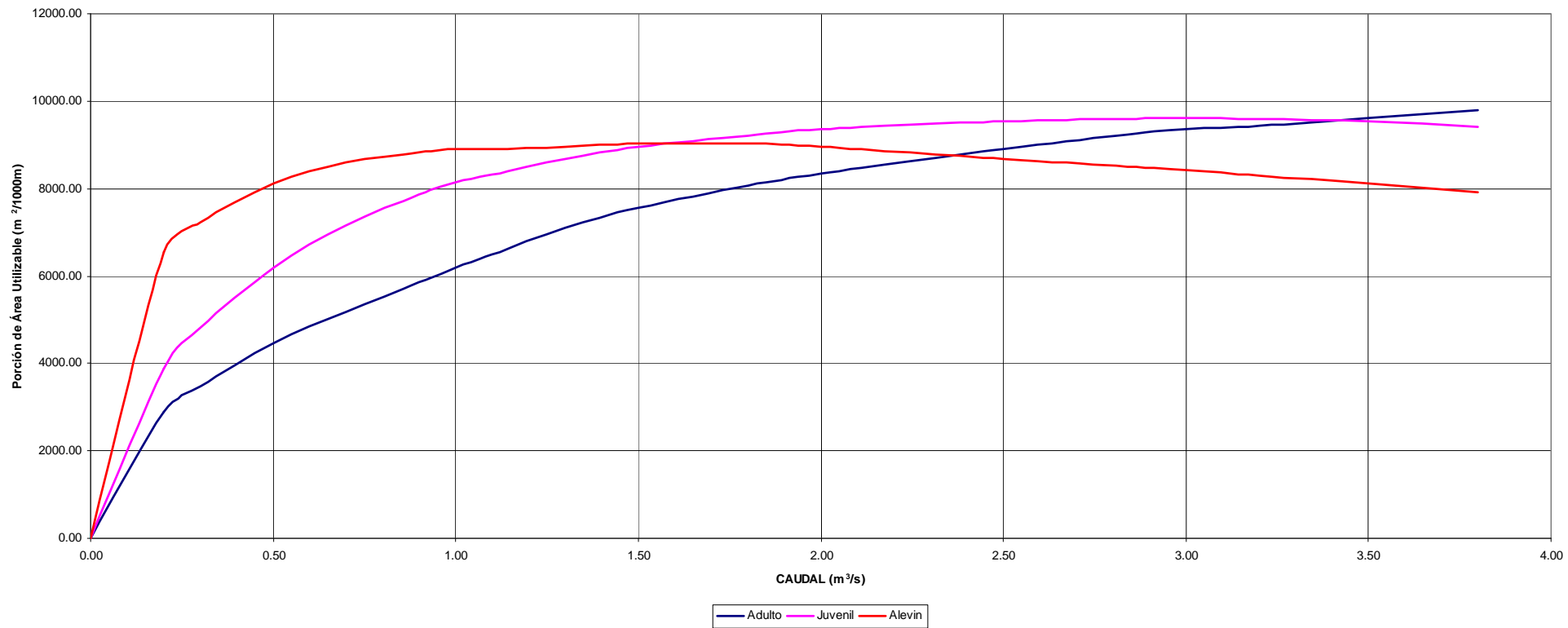


Figura No. 3. Hábitat vs. Caudal - Squalius Pirenaycus

En la Figura No. 3 se observa el comportamiento de la especie SQUALIUS PIRENAYCUS marcado por cada una de sus etapas. Las tres etapas muestran un comportamiento similar, aumentado en diferentes proporciones la porción de área utilizable a medida que aumenta el caudal.

Un análisis más detallado muestra que en la etapa alevín, a descargas bajas alcanza una gran porción de área disponible. Las etapas juvenil y alevín presentan un máximo de disponibilidad de área en 9700 y 9150 m²/1000m respectivamente, después de estos puntos máximos presentan un comportamiento descendiente. Caso contrario ocurre con la etapa adulta en donde su comportamiento no presenta máximos ni puntos de inflexión, mostrando siempre una mayor disponibilidad de área para caudales mayores.

Esta especie presenta una mayor tolerancia a los caudales altos en todos los estadios en comparación del Barbus Bocagei, pero en el estadio Alevín, se presenta una preferencia por caudales medios, lo que hace que meses como julio y noviembre sean perfectos para el desarrollo de este estadio.

- c. A continuación se muestran las curvas de la especie Chodostroma Polypepsis obtenidas después de la simulación:

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS

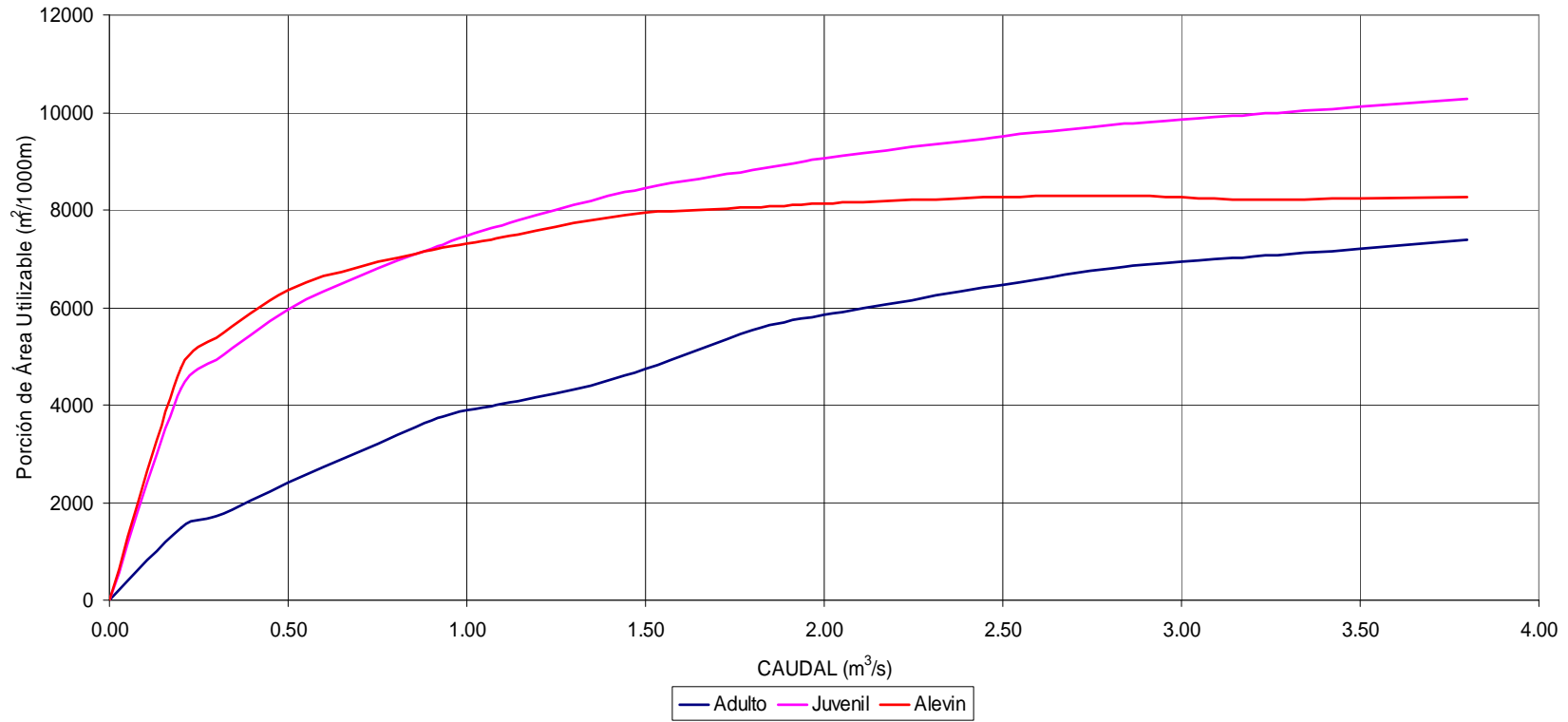


Figura No. 4. Hábitat vs. Caudal- *Chondrostoma Polypepsis*

En la Figura No. 4 se muestra la especie CHONDROSTAMA POLYPEPSIS en sus diferentes estadios. Las etapas juvenil y alevín presentan requerimientos de disponibilidad de área similares para caudales bajos, que varían entre 0.00 - 0,80 m³/s . Estos dos estadios presentan un punto de equilibrio en una disponibilidad de 2400 m²/1000 m. A partir de este punto presentan diferentes comportamientos, la etapa alevín llega a un máximo valor de disponibilidad de área y luego decrece, por otro lado, la etapa juvenil presenta un comportamiento proporcional después de este equilibrio.

La etapa adulta presenta una tendencia casi lineal mostrando una proporcionalidad entre la disponibilidad de área y el caudal requerido. Esto quiere decir que en esta especie, a mayores caudales se tiene un mejor desarrollo del estadio Adulto. Por lo tanto, para un desarrollo óptimo de este estadio son propicios meses como enero y diciembre. Por el contrario, los otros dos estadios prefieren caudales medios a bajos por lo que el desarrollo de estos estadios sería óptimo en el periodo comprendido de abril a junio.

5.2. FILTRACIÓN

5.2.1. Filtro Opciones HABTAE

Como se hizo referencia en el capítulo anterior, es necesario analizar las diferentes opciones que se presentan en la modelación de hábitat mediante la modalidad HABTAE. Para efectos del manejo de resultados, los tipos de modelos se van a llamar de la siguiente forma: El modelo "Estandard Calculation" se llamará modelo Estándar, el modelo "Geometric Mean" será llamado modelo Geométrico y por último, el modelo "Lowest Limiting Factor" será llamado modelo del Factor Mínimo.

Los resultados serán mostrados por especie para un mejor entendimiento de los mismos.

a. Resultados Barbus Bocagei

En el Cuadro No. 1 a 3 y Figura No. 5 a 7 se muestran los resultados obtenidos después de la modelación de hábitat para los estadios de Barbus Bocagei Adulto, Juvenil y Alevín.

BARBUS BOCAGEI - ADULTO			
Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	97.90	1376.75	525.09
0.30	128.93	1535.57	646.65
0.50	167.87	1909.51	762.69
0.70	228.69	2309.59	895.15
0.90	313.26	2783.01	1042.61
1.00	363.60	2964.68	1154.15
1.10	411.21	3116.25	1258.33
1.30	516.33	3428.47	1467.69
1.50	637.90	3832.86	1626.05
1.80	879.67	4580.35	1822.35
2.00	1049.27	4922.87	1925.40
2.50	1447.38	5592.56	2152.01
2.81	1773.67	6063.50	2345.30
3.00	1963.60	6307.80	2438.71
3.20	2073.28	6457.21	2530.45
3.50	2272.86	6703.68	2713.26
3.80	2454.76	6907.06	2888.45

Cuadro No. 1. Diferencia de modelos HABTAE para Barbus Bocagei Adulto.

BARBUS BOCAGEI - JUVENIL			
Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	835.30	4129.28	1603.30
0.30	1340.41	5151.14	2492.11
0.50	2247.13	6571.65	3721.14
0.70	2991.52	7421.93	4379.49
0.90	3603.27	8077.75	4863.10
1.00	3852.63	8323.26	5068.95
1.10	4022.82	8490.60	5192.71
1.30	4359.67	8824.62	5428.31
1.50	4591.16	9045.88	5564.79
1.80	4834.62	9299.02	5759.99
2.00	4948.90	9435.36	5912.37
2.50	5174.06	9635.83	6132.25
2.81	5290.63	9723.53	6200.06
3.00	5352.10	9767.08	6225.01
3.20	5368.46	9782.25	6255.15
3.50	5365.20	9788.47	6304.90
3.80	5386.45	9814.94	6364.76

Cuadro No. 2. Diferencia de modelos HABTAE para Barbus Bocagei Juvenil.

BARBUS BOCAGEI - ALEVÍN			
Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	831.48	1970.68	984.28
0.30	1148.19	2512.18	1358.72
0.50	2190.16	4560.75	2578.10
0.70	2748.97	5711.52	3348.52
0.90	3283.22	6674.82	3680.47
1.00	3588.30	7309.01	3933.91
1.10	3980.69	7747.66	4265.28
1.30	4651.00	8365.59	4916.78
1.50	4718.88	8355.26	5119.49
1.80	4563.15	8315.40	4790.96
2.00	4514.02	8350.37	4689.66
2.50	4009.78	8351.93	4154.57
2.81	3664.56	8212.79	3792.10
3.00	3422.76	8031.59	3531.86
3.20	3224.03	7923.37	3348.91
3.50	2993.49	7785.74	3102.50
3.80	2806.33	7675.94	2972.62

Cuadro No. 3. Diferencia de modelos HABTAE para Barbus Bocagei Alevín.

BARBUS BOCAGEI - ADULTO

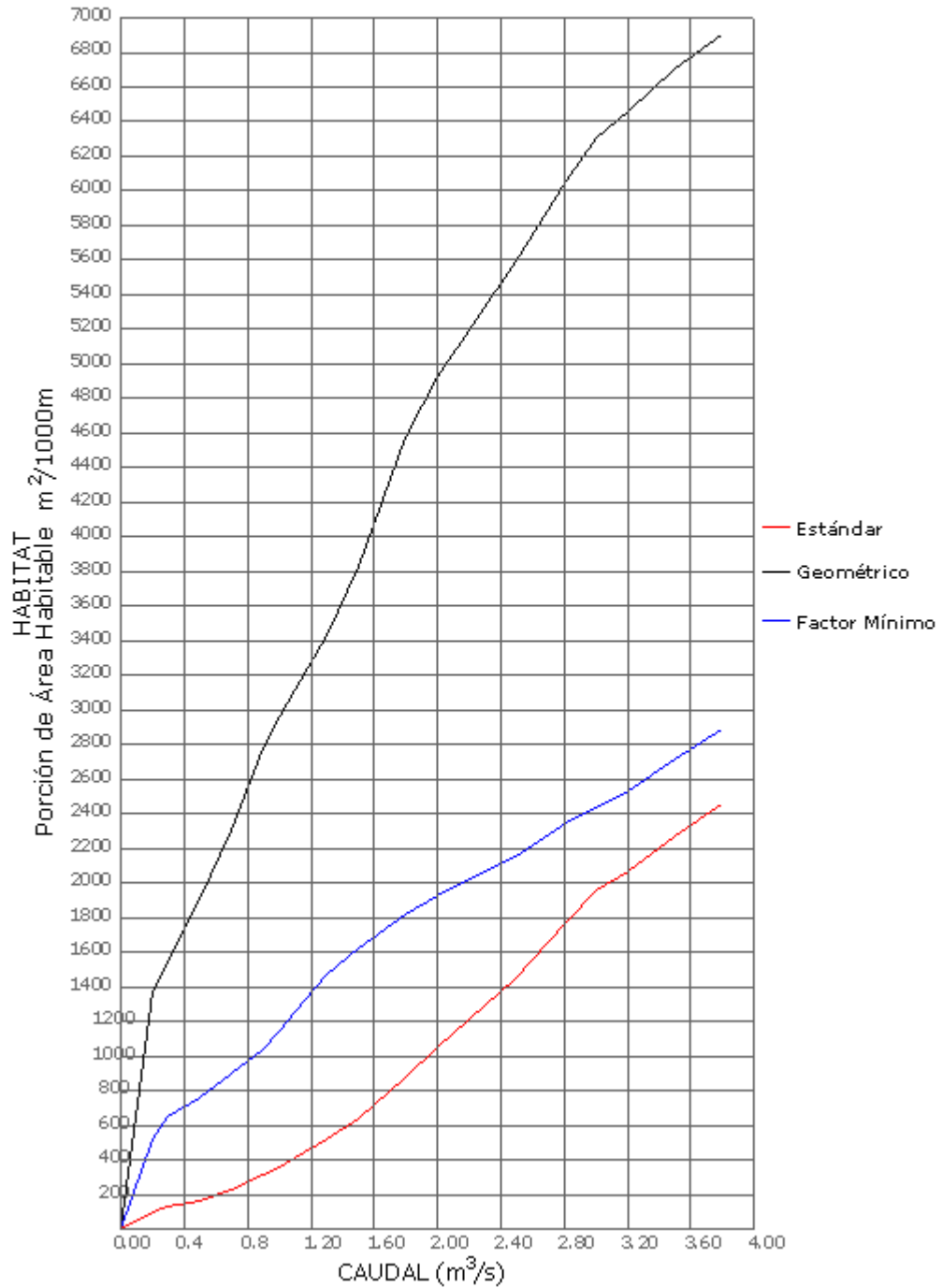


Figura No. 5. Modelación del Hábitat Barbus-Adulto

BARBUS BOCAGEI - JUVENIL

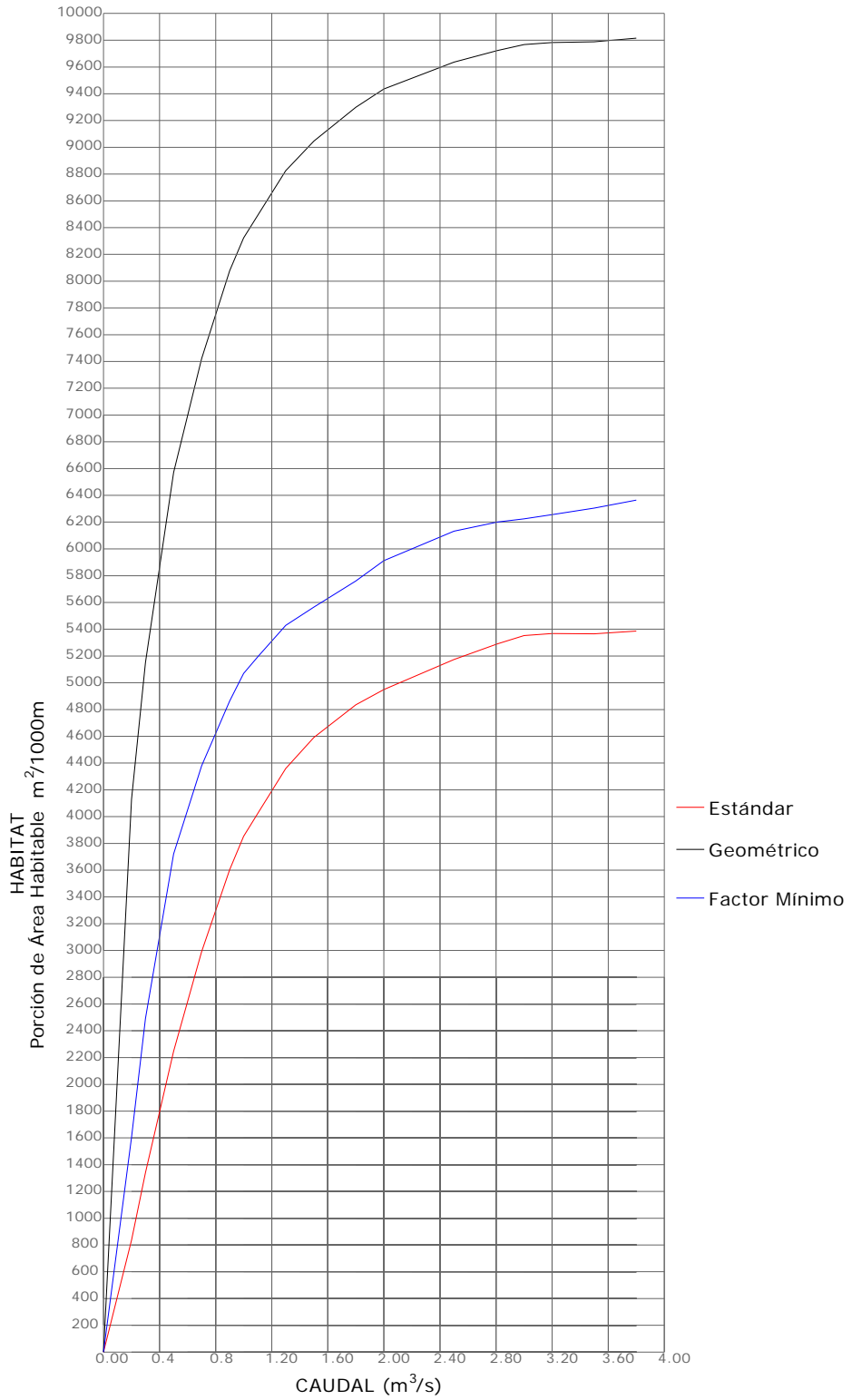


Figura No. 6. Modelación del Hábitat Barbus-Juvenil

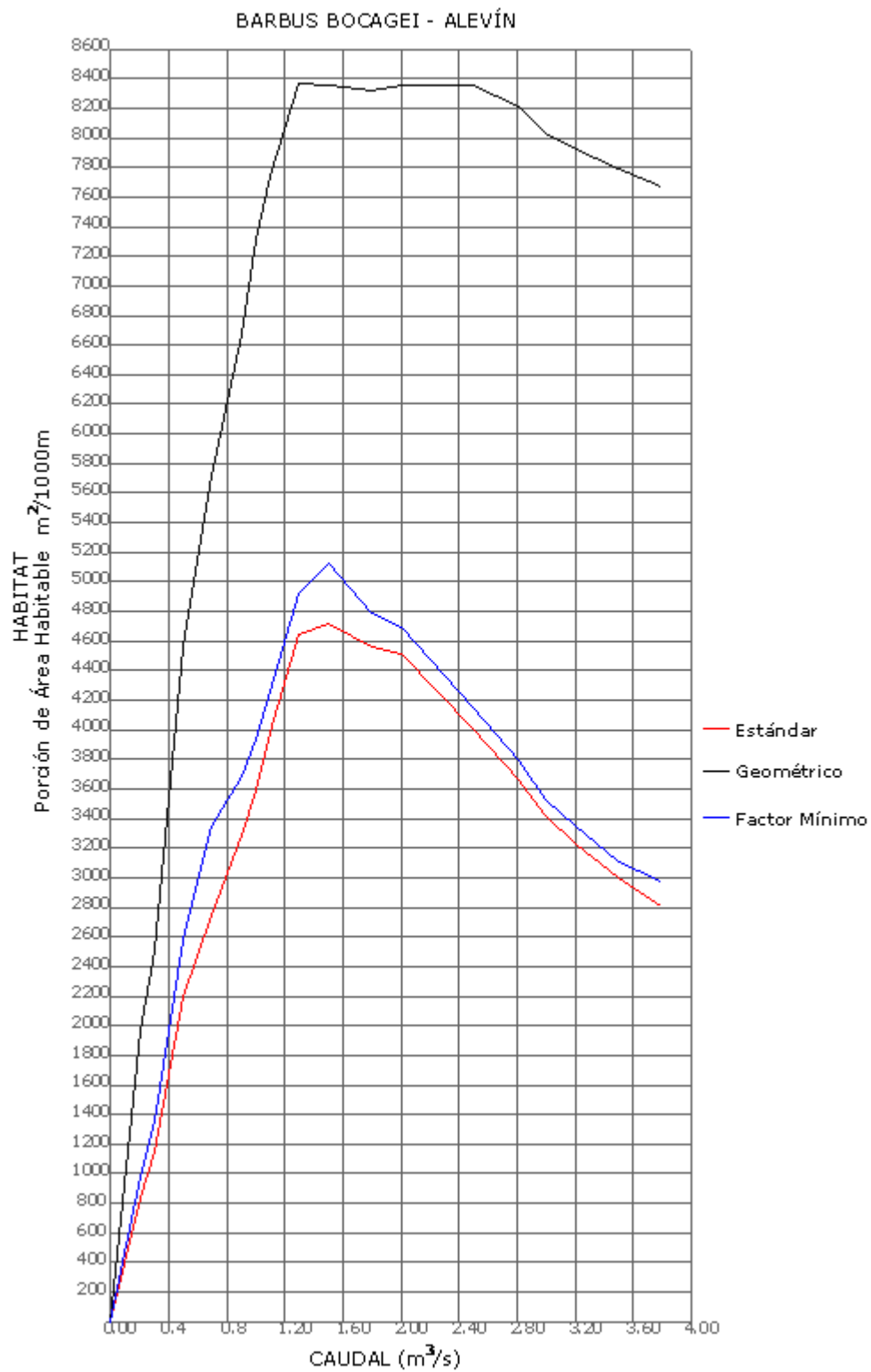


Figura No. 7. Modelación del Hábitat Barbus-Alevín

Para esta especie en todos los estadios los resultados obtenidos para cada tipo de modelo difieren mucho de uno a otro. Se observa claramente que el modelo con los resultados de hábitat más bajos para esta especie en sus diferentes estadios es el modelo Estándar. Por el contrario, los mayores resultados de hábitat se obtienen en el modelo Geométrico. El modelo intermedio es el del Factor Mínimo.

En todos los estadios de esta especie, las curvas que se obtienen como resultado guardan una similitud en su forma, cambiando la amplitud que presenta en cada una de estas curvas. Se observa que en la curva del estadio alevín se presenta un pico de hábitat en cierto caudal y luego desciende. En el caso del estadio Juvenil, el comportamiento de las curvas es asintótico. Por último, en el estadio Adulto se presenta un comportamiento incremental del hábitat a medida que el caudal también aumenta.

En los Cuadros No. 4 a 6 se presenta la comparación de resultados a nivel porcentual entre los diferentes modelos. Esta comparación toma como base el modelo Estándar, es decir, el porcentaje de error se obtiene en función de la variación que tiene los modelos con respecto al Estándar.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN MODELO ESTÁNDAR CON GEOMÉTRICO	FACTOR MÍNIMO
0.20	1306.28	436.35
0.30	1091.01	401.55
0.50	1037.49	354.33
0.70	909.92	291.43
0.90	788.40	232.83
1.00	715.37	217.42
1.10	657.82	206.01
1.30	564.01	184.25
1.50	500.86	154.91
1.80	420.69	107.16
2.00	369.17	83.50
2.50	286.39	48.68
2.81	241.86	32.23
3.00	221.24	24.20
3.20	211.45	22.05
3.50	194.94	19.38
3.80	181.37	17.67

Cuadro No. 4. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para Barbus Bocagei Adulto.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	394.35	91.94
0.30	284.30	85.92
0.50	192.45	65.60
0.70	148.10	46.40
0.90	124.18	34.96
1.00	116.04	31.57
1.10	111.06	29.08
1.30	102.41	24.51
1.50	97.03	21.21
1.80	92.34	19.14
2.00	90.66	19.47
2.50	86.23	18.52
2.81	83.79	17.19
3.00	82.49	16.31
3.20	82.22	16.52
3.50	82.44	17.51
3.80	82.22	18.16

Cuadro No. 5. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para *Barbus Bocagei* Juvenil.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	137.01	18.38
0.30	118.79	18.34
0.50	108.24	17.71
0.70	107.77	21.81
0.90	103.30	12.10
1.00	103.69	9.63
1.10	94.63	7.15
1.30	79.87	5.71
1.50	77.06	8.49
1.80	82.23	4.99
2.00	84.99	3.89
2.50	108.29	3.61
2.81	124.11	3.48
3.00	134.65	3.19
3.20	145.76	3.87
3.50	160.09	3.64
3.80	173.52	5.93

Cuadro No. 6. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para *Barbus Bocagei* Alevín.

Al analizar los valores de la diferencia porcentual obtenida se tiene que a mayor caudal la diferencia de errores va siendo menor en el caso del estadio adulto, mientras que en los otros dos estadios se presenta un descenso en los errores

hasta cierto caudal y posterior a este caudal los errores comienzan un leve ascenso.

El comportamiento en el estadio adulto se debe a que a mayor caudal aumenta la porción de área disponible, haciendo que las diferencias se reduzcan. Mientras que en el caso de los estadios Juvenil y Alevín, el comportamiento que presentan sus errores se debe a la forma de las curvas de caudal vs. hábitat respectiva.

En el caso del Factor Mínimo y el método Estándar, para caudales bajos la porción de área disponible es baja, lo contrario sucede con el método geométrico, el cuál para valores de caudal bajos tiene una gran porción de área disponible haciendo que los errores se magnifiquen en todos los estadios.

En la comparación con ambos métodos en el estadio adulto se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 1306.28% para el Geométrico y de 436.35 % para el Factor Mínimo. Mientras que el menor error se presenta en el caudal más alto siendo de 17.67% para el Factor mínimo y de 181.37% para el Geométrico.

En el estadio juvenil se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 394.35% para el Geométrico y de 91.94 % para el Factor Mínimo. Mientras que el menor error se presenta en el caudal de 3.20 m³/s siendo de 18.16% para el Factor mínimo y de 82.22 % para el Geométrico, en este caudal se produce la mayor cantidad de porción de hábitat disponible para el modelo Estándar.

Y en el estadio Alevín se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 137.01% para el Geométrico y de 18.38 % para el Factor Mínimo. Mientras que el menor error se presenta en el caudal de 1.50 m³/s siendo de 8.49% para el Factor mínimo y de 77.06% para el Geométrico, en este caudal se produce la mayor cantidad de porción de hábitat disponible para el modelo Estándar.

b. Resultados Chondrostoma Polypepsis

En los Cuadros No. 7 a 9 y Figuras No. 8 a 10 se muestran los resultados obtenidos después de la modelación de hábitat para la especie de Chondrostoma Polypepsis.

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS - ADULTO

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	115.68	1477.88	619.76
0.30	186.00	1731.68	797.51
0.50	334.47	2420.33	1097.90
0.70	498.93	3058.59	1376.88
0.90	650.67	3691.87	1549.24
1.00	729.56	3885.70	1625.15
1.10	799.54	4029.16	1677.95
1.30	937.89	4326.96	1772.23
1.50	1064.26	4746.71	1860.64
1.80	1329.15	5536.41	2113.59
2.00	1511.67	5849.00	2279.67
2.50	1888.72	6454.71	2589.11
2.81	2059.34	6796.85	2720.04
3.00	2158.25	6934.70	2771.21
3.20	2248.77	7050.52	2822.38
3.50	2384.08	7212.44	2897.02
3.80	2564.09	7401.98	3035.45

Cuadro No. 7. Diferencia de modelos HABTAE para Chondrostoma Polyepsis Adulto.

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS - JUVENIL

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	802.59	4332.25	1722.82
0.30	1074.86	4934.60	2175.30
0.50	1621.58	5949.84	3071.59
0.70	2149.96	6655.95	3814.06
0.90	2627.36	7218.03	4392.26
1.00	2864.47	7477.24	4664.59
1.10	3064.47	7690.96	4889.79
1.30	3440.38	8118.62	5245.30
1.50	3761.26	8444.47	5552.07
1.80	4176.92	8823.47	5904.43
2.00	4444.17	9057.05	6110.97
2.50	4993.37	9509.12	6521.75
2.81	5293.82	9739.73	6741.20
3.00	5454.07	9857.35	6847.03
3.20	5597.48	9965.37	6944.91
3.50	5816.78	10124.83	7100.70
3.80	6019.58	10277.25	7260.72

Cuadro No. 8. Diferencia de modelos HABTAE para Chondrostoma Polyepsis Juvenil.

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS - ALEVÍN

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	1088.10	4765.72	2966.01
0.30	1366.25	5382.50	3386.44
0.50	1898.43	6363.19	4129.57
0.70	2255.05	6830.74	4343.56
0.90	2531.15	7167.51	4515.41
1.00	2660.12	7322.14	4620.85
1.10	2759.67	7443.20	4710.67
1.30	2952.34	7728.88	4919.29
1.50	3109.55	7937.17	4999.69
1.80	3201.43	8052.21	5056.86
2.00	3263.18	8135.37	5115.60
2.50	3357.29	8270.47	5189.98
2.81	3373.11	8283.20	5123.20
3.00	3374.90	8271.71	5068.73
3.20	3349.44	8222.66	5013.95
3.50	3362.65	8242.12	5010.86
3.80	3356.29	8253.10	5013.24

Cuadro No. 9. Diferencia de modelos HABTAE para Chondrostoma Polypepsis Alevín.

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS - ADULTO

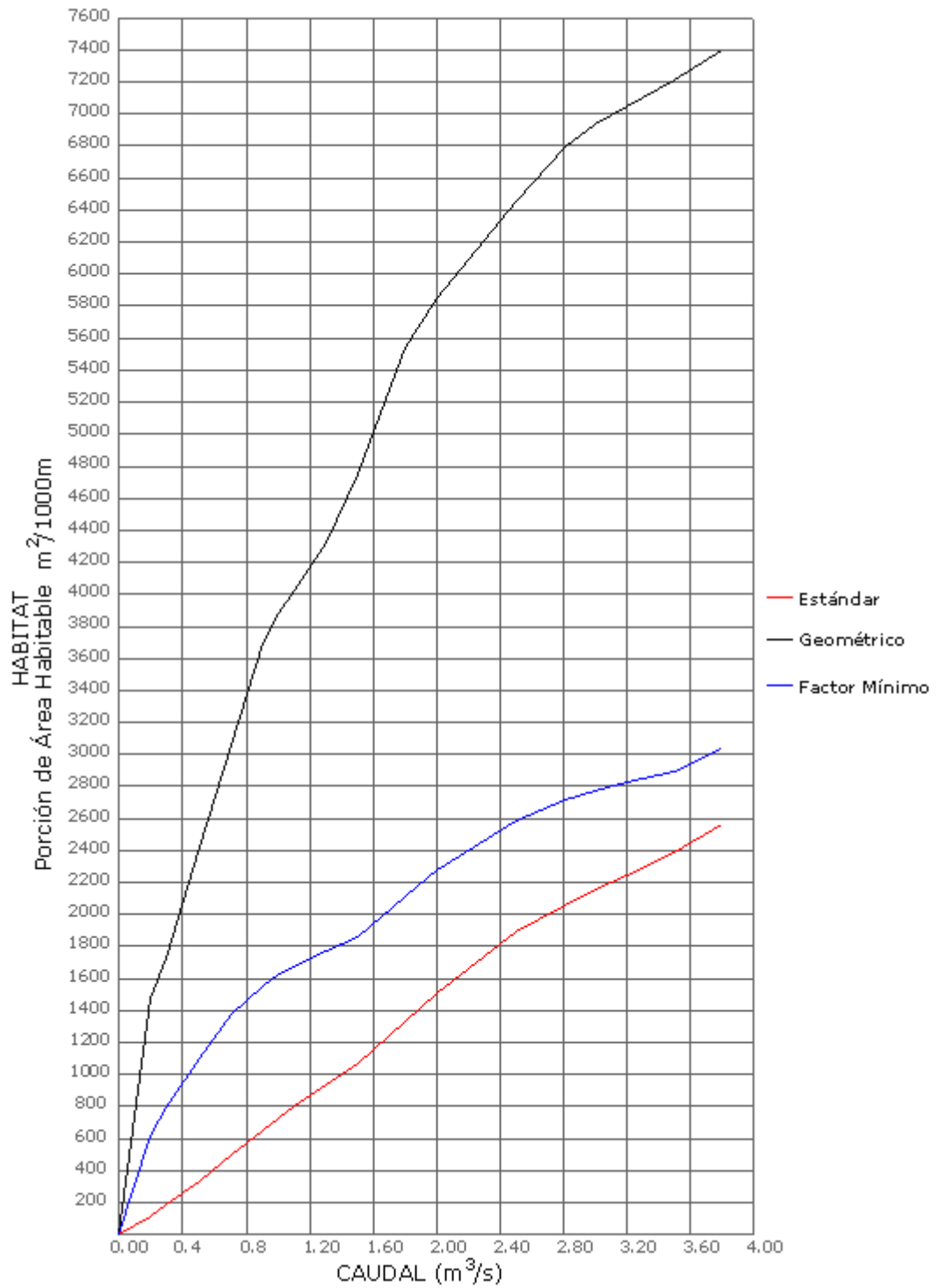


Figura No. 8. Modelación del Hábitat Chondrostoma Polypepsis-Adulto

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS - JUVENIL

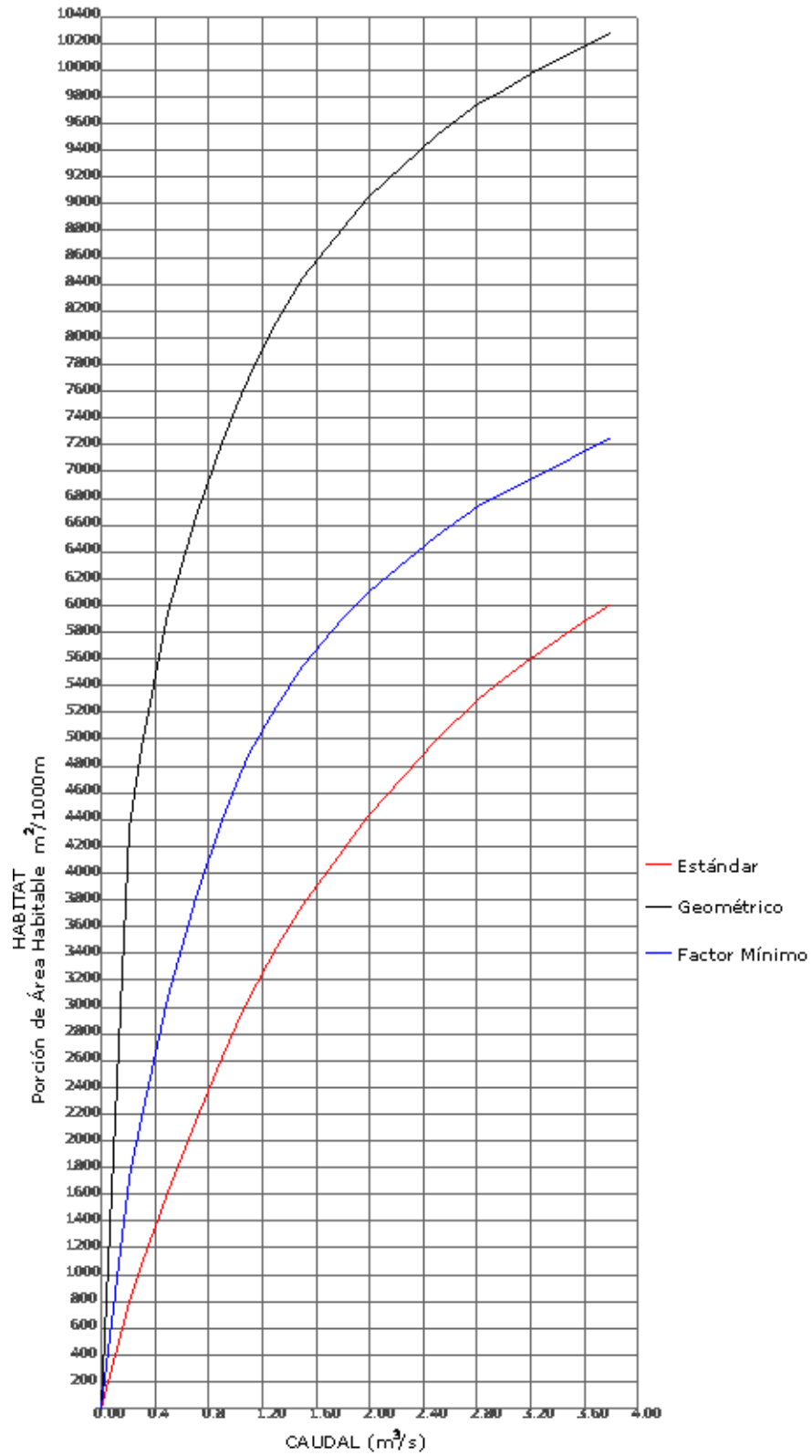


Figura No. 9. Modelación del Hábitat Chondrostoma Polypepsis -Juvenil

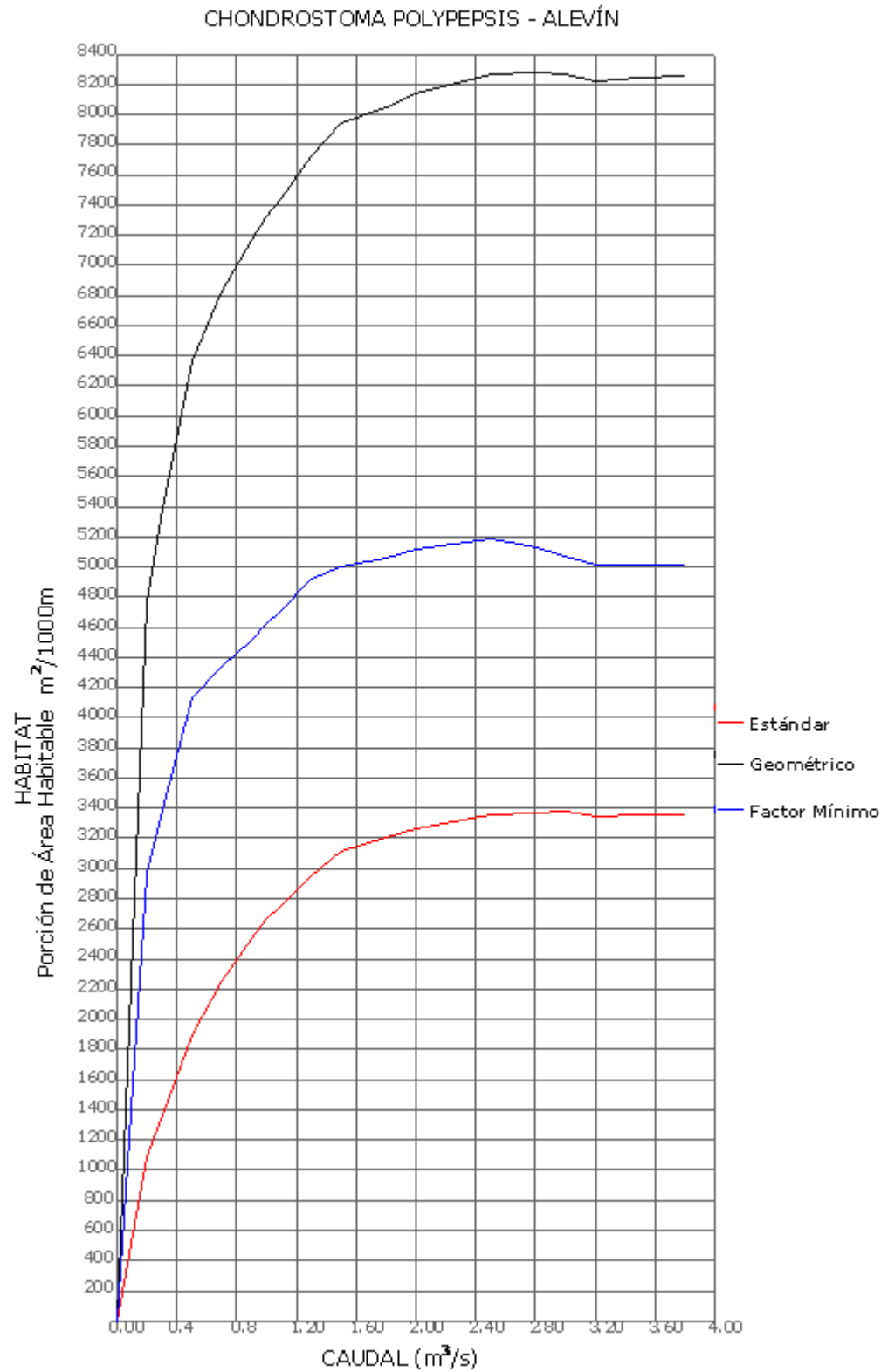


Figura No. 10. Modelación del Hábitat Chondrostoma Polypepsis -Alevín

Como se puede observar, los resultados obtenidos para cada tipo de modelo difieren mucho de uno a otro, al igual que sucedía para la especie anterior. Se observa claramente que el modelo con los resultados de hábitat más bajos para esta especie es el modelo Estándar. Por el contrario, los mayores resultados de hábitat se obtienen en el modelo Geométrico. El modelo intermedio es el de Factor Mínimo.

En esta especie, las curvas que se obtuvieron como resultado guardan una similitud en su forma, presentando valores y amplitudes diferentes en cada estadio. En el estadio adulto se observa un comportamiento con cierta tendencia lineal y proporcional entre el hábitat y el caudal. En el estadio juvenil la tendencia inicial de las tres curvas pareciera ser lineal y posteriormente el hábitat tiende a ser cada vez menor con respecto al caudal. En el caso del estadio Alevín, se observa como a medida que el caudal aumenta inicialmente el hábitat también lo hace de manera pronunciada, no obstante, las tres curvas en su parte final tienden a ser asintóticas. En todos los estadios las diferencias que se tienen entre el modelo Geométrico y los otros dos modelos son muy grandes, mostrando el modelo geométrico grandes porciones de área en toda la curva.

Al comparar las gráficas de esta especie con las del *Barbus Bocagei*, se puede observar un comportamiento similar en cuanto a su forma y las diferencias entre modelos.

En los Cuadros No. 10 a 12 se presenta la comparación de resultados a nivel porcentual entre los diferentes modelos. Esta comparación, al igual que en el caso anterior, toma como base el modelo Estándar para obtener la diferencia porcentual.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	1177.56	435.75
0.30	831.01	328.77
0.50	623.63	228.25
0.70	513.03	175.97
0.90	467.40	138.10
1.00	432.61	122.76
1.10	403.93	109.86
1.30	361.35	88.96
1.50	346.01	74.83
1.80	316.54	59.02
2.00	286.92	50.80
2.50	241.75	37.08
2.81	230.05	32.08
3.00	221.31	28.40
3.20	213.53	25.51
3.50	202.53	21.52
3.80	188.68	18.38

Cuadro No. 10. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para Chondrostoma Polypepsis Adulto.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	439.78	114.66
0.30	359.09	102.38
0.50	266.92	89.42
0.70	209.58	77.40
0.90	174.73	67.17
1.00	161.03	62.84
1.10	150.97	59.56
1.30	135.98	52.46
1.50	124.51	47.61
1.80	111.24	41.36
2.00	103.80	37.51
2.50	90.43	30.61
2.81	83.98	27.34
3.00	80.73	25.54
3.20	78.03	24.07
3.50	74.06	22.07
3.80	70.73	20.62

Cuadro No. 11. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para Chondrostoma Polypepsis Juvenil.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN MODELO ESTÁNDAR CON GEOMÉTRICO	FACTOR MÍNIMO
0.20	337.99	172.59
0.30	293.96	147.86
0.50	235.18	117.53
0.70	202.91	92.61
0.90	183.17	78.39
1.00	175.26	73.71
1.10	169.71	70.70
1.30	161.79	66.62
1.50	155.25	60.78
1.80	151.52	57.96
2.00	149.31	56.77
2.50	146.34	54.59
2.81	145.57	51.88
3.00	145.09	50.19
3.20	145.49	49.70
3.50	145.11	49.02
3.80	145.90	49.37

Cuadro No. 12. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para Chondrostoma Polypepsis Alevín.

En la comparación con ambos métodos para el estadio Adulto, se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 1177.56% para el Geométrico y de 435.75% para el Factor Mínimo. Mientras que el menor error se presenta en el caudal más alto siendo de 18.38% para el Factor mínimo y de 188.68% para el Geométrico, en este caudal se produce la mayor cantidad de porción de hábitat disponible para el modelo Estándar. Se puede observar que la tendencia que presentaba la anterior especie en este mismo estadio se conserva.

En el caso del estadio Juvenil se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 439.78% para el Geométrico y de 125.66 % para el Factor Mínimo. Mientras que el menor error se presenta en el mayor caudal siendo de 20.62% para el Factor mínimo y de 70.73% para el Geométrico, en este caudal se produce la mayor cantidad de porción de hábitat disponible para el modelo Estándar. A diferencia del Barbus Bocagei, en este estadio se presenta un comportamiento uniforme en la disminución de error, manteniéndose constante la tendencia descendente del mismo, a medida que aumenta el caudal.

Por último en el estadio Alevín se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 337.99% para el Geométrico y de 72.59% para el Factor Mínimo. El menor error se presenta en el caudal de 3.50 m³/s siendo de 49.02% para el Factor mínimo y de 145.11% para el Geométrico en un caudal igual a 3.00 m³/s. A diferencia del Barbus Bocagei, en este estadio

se presentan errores relativamente grandes, y no se tiene una similitud tan parecida entre los modelos del Factor Mínimo y el Estándar.

c. Resultados Squalius Pyrenaicus

En los Cuadros No. 13 a 15 y Figuras No. 11 a 13 se muestran los resultados obtenidos después de la modelación de hábitat para la especie de Squalius Pyrenaicus.

SQUALIUS PYRENAICUS - ADULTO			
Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	309.27	2903.76	647.63
0.30	457.65	3469.31	923.59
0.50	808.08	4462.22	1497.23
0.70	1163.57	5167.14	2011.52
0.90	1640.64	5850.94	2732.43
1.00	1930.37	6190.88	3138.32
1.10	2205.90	6499.37	3513.12
1.30	2776.99	7095.62	4169.01
1.50	3250.25	7556.20	4675.23
1.80	3796.05	8080.14	5041.85
2.00	4071.58	8338.00	5290.81
2.50	4746.62	8898.85	5907.64
2.81	5175.32	9199.06	6219.14
3.00	5397.91	9353.43	6379.35
3.20	5527.89	9440.25	6512.38
3.50	5778.90	9620.32	6755.78
3.80	6003.70	9789.12	7034.52

Cuadro No. 13. Diferencia de modelos HABTAE para Squalius Pyrenaicus Adulto.

SQUALIUS PYRENAICUS - JUVENIL

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	671.48	3869.26	1305.21
0.30	1134.36	4807.93	1995.97
0.50	2005.05	6202.91	3453.00
0.70	2787.09	7152.04	4866.78
0.90	3436.97	7860.40	5788.53
1.00	3739.10	8145.86	6113.38
1.10	3926.59	8323.08	6301.03
1.30	4298.27	8677.17	6786.57
1.50	4625.24	8960.06	7162.44
1.80	4915.83	9206.52	7391.84
2.00	5045.26	9349.27	7550.17
2.50	5174.05	9539.14	7657.07
2.81	5202.07	9601.63	7600.33
3.00	5194.64	9619.54	7531.60
3.20	5108.88	9595.58	7428.01
3.50	4944.73	9526.72	7240.98
3.80	4736.12	9423.63	7004.64

Cuadro No. 14. Diferencia de modelos HABTAE para Squalius Pyrenaicus Juvenil.

SQUALIUS PYRENAICUS - ALEVÍN

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)		
	Estándar	Geométrica	Factor mínimo
0.20	2525.57	6539.95	4587.80
0.30	2978.09	7218.65	5517.73
0.50	3698.15	8129.31	6445.76
0.70	4329.48	8596.44	6771.15
0.90	4640.01	8819.13	6851.92
1.00	4734.23	8899.90	6882.41
1.10	4687.90	8902.32	6867.14
1.30	4554.65	8951.75	6890.15
1.50	4582.49	9038.70	6900.95
1.80	4521.35	9025.13	6638.77
2.00	4359.81	8946.98	6535.46
2.50	3947.03	8685.47	6143.45
2.81	3747.57	8523.94	5913.77
3.00	3607.09	8419.01	5775.45
3.20	3452.14	8297.43	5620.32
3.50	3207.01	8114.78	5466.82
3.80	2938.18	7911.81	5240.12

Cuadro No. 15. Diferencia de modelos HABTAE para Squalius Pyrenaicus Alevín.

SQUALIUS PYRENAICUS - ADULTO

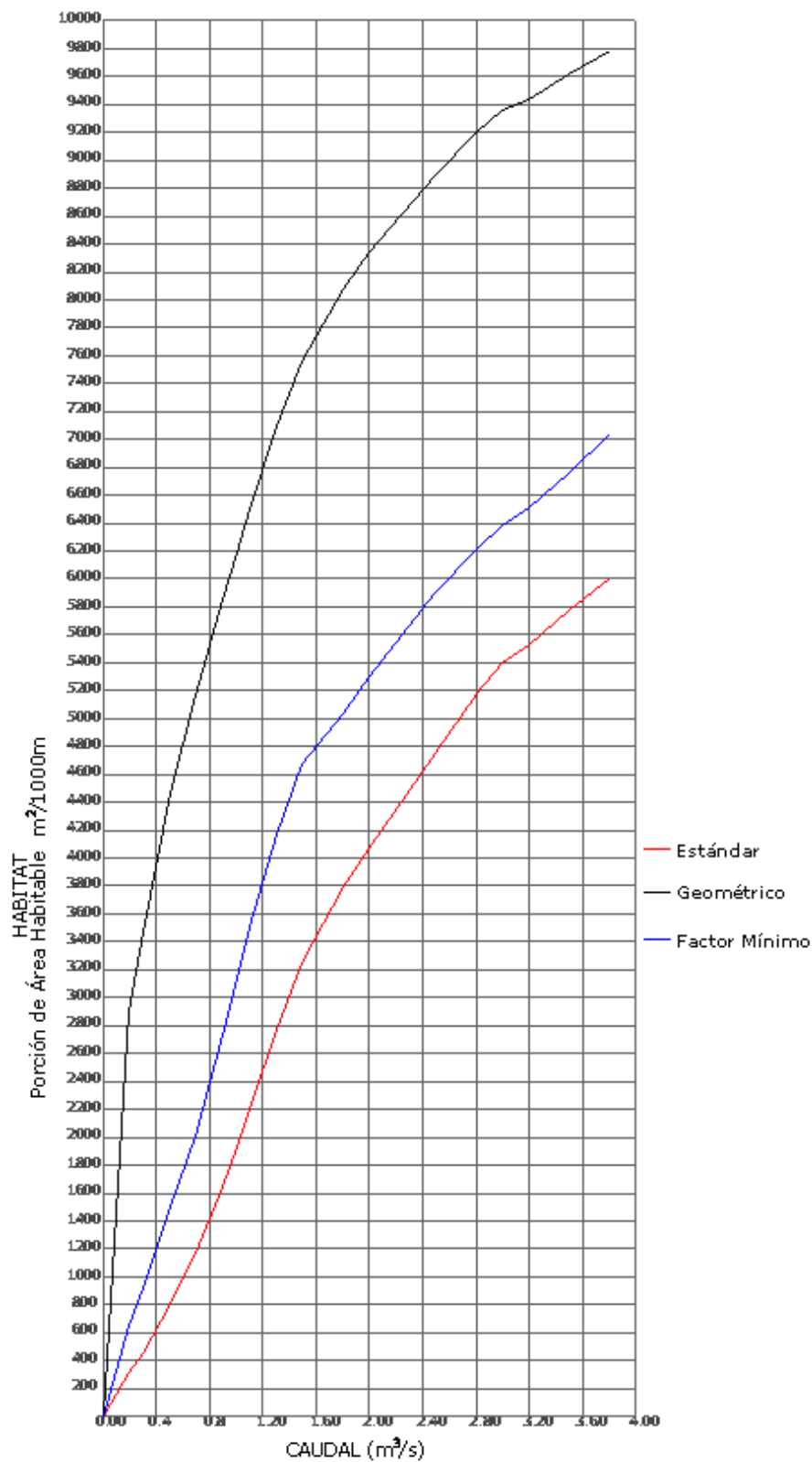


Figura No. 11. Modelación del Hábitat Squalius Pyrenaicus -Adulto

SQUALIUS PYRENAICUS - JUVENIL

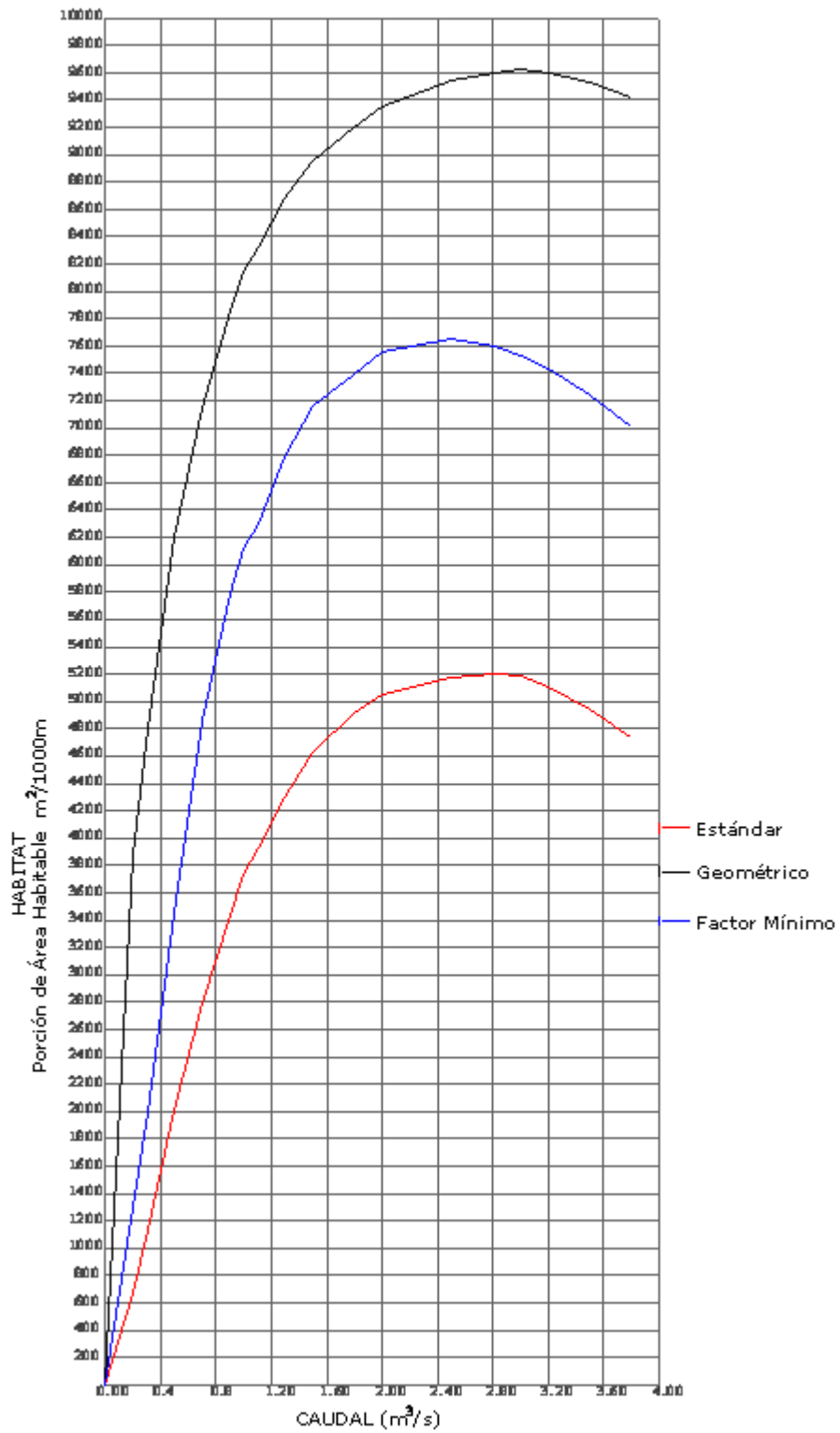


Figura No. 12. Modelación del Hábitat Squalius Pyrenaicus -Juvenil

SQUALIUS PYRENAICUS - ALEVÍN

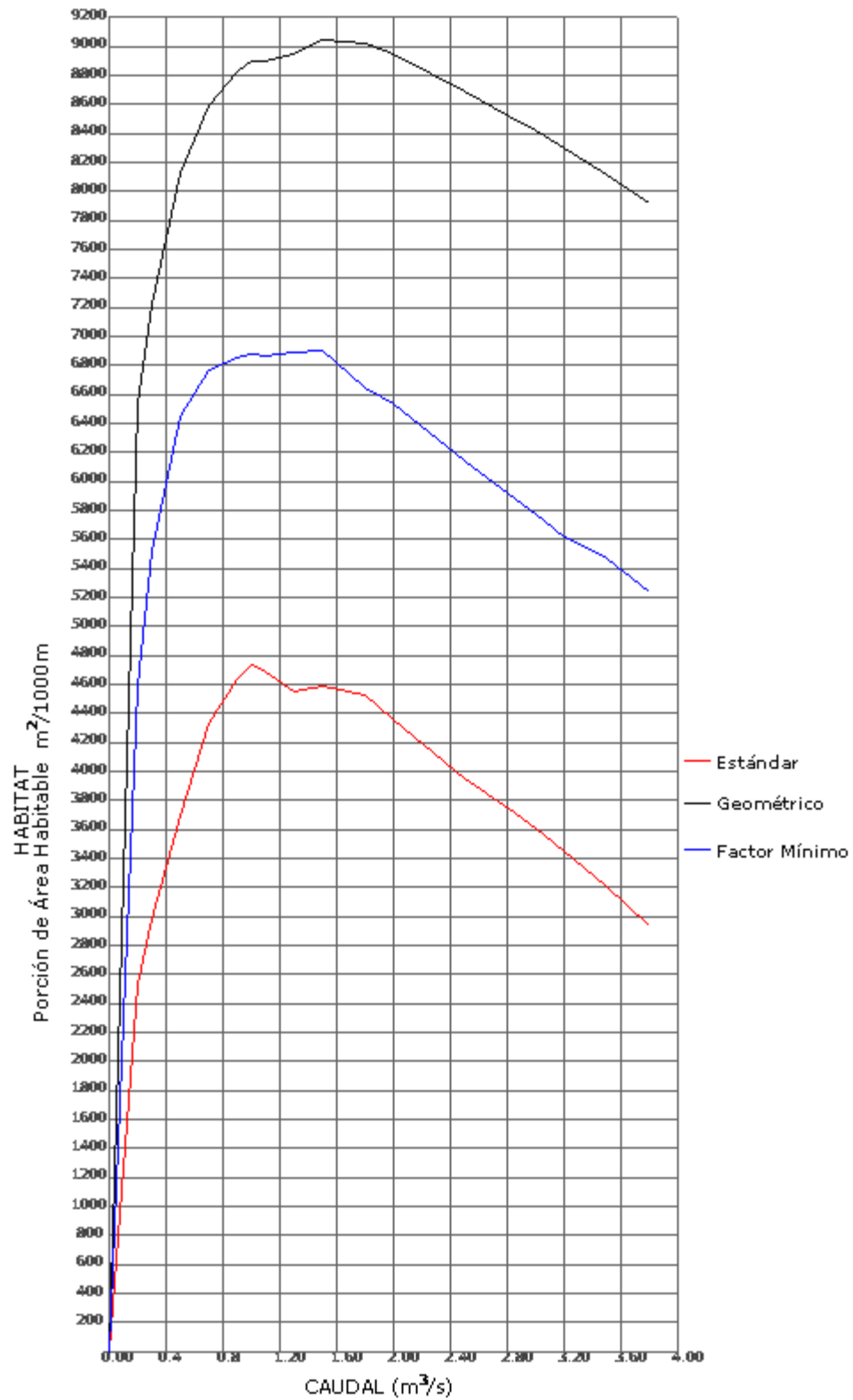


Figura No. 13. Modelación del Hábitat Squalius Pyrenaicus -Alevín

Se observa claramente que el modelo con los resultados de hábitat más bajos para esta especie también es el modelo Estándar. Por el contrario, los mayores resultados de hábitat los obtiene el modelo Geométrico. El modelo intermedio es el de Factor Mínimo. En los tres estadios las curvas que se obtienen como resultado guardan una similitud en su forma, presentando comportamientos muy similares entre sí. Para el estadio adulto las curvas presentan un comportamiento de aumento en el hábitat con respecto al caudal. En los estadios Juvenil y Alevín se presenta un punto de inflexión en las gráficas de tal forma que llegan a un punto máximo de hábitat para cierto caudal y después de éste, el hábitat comienza a decrecer a medida que aumenta el caudal.

En los Cuadro No. 16 a 18 se presenta la comparación de resultados a nivel porcentual entre los diferentes modelos. Esta comparación toma como base el modelo Estándar, es decir el porcentaje de error se obtiene a partir del valor que tiene el modelo Estándar.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	838.91	109.41
0.30	658.07	101.81
0.50	452.20	85.28
0.70	344.08	72.87
0.90	256.63	66.55
1.00	220.71	62.58
1.10	194.64	59.26
1.30	155.51	50.13
1.50	132.48	43.84
1.80	112.86	32.82
2.00	104.79	29.94
2.50	87.48	24.46
2.81	77.75	20.17
3.00	73.28	18.18
3.20	70.77	17.81
3.50	66.47	16.90
3.80	63.05	17.17

Cuadro No. 16. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para *Squalius Pyrenaicus* Adulto.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	476.23	94.38
0.30	323.85	75.96
0.50	209.36	72.22
0.70	156.61	74.62
0.90	128.70	68.42
1.00	117.86	63.50
1.10	111.97	60.47
1.30	101.88	57.89
1.50	93.72	54.86
1.80	87.28	50.37
2.00	85.31	49.65
2.50	84.37	47.99
2.81	84.57	46.10
3.00	85.18	44.99
3.20	87.82	45.39
3.50	92.66	46.44
3.80	98.97	47.90

Cuadro No. 17. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para Squalius Pyrenaicus Juvenil.

Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN GEOMÉTRICO	MODELO ESTÁNDAR CON FACTOR MÍNIMO
0.20	158.95	81.65
0.30	142.39	85.28
0.50	119.82	74.30
0.70	98.56	56.40
0.90	90.07	47.67
1.00	87.99	45.38
1.10	89.90	46.49
1.30	96.54	51.28
1.50	97.24	50.59
1.80	99.61	46.83
2.00	105.21	49.90
2.50	120.05	55.65
2.81	127.45	57.80
3.00	133.40	60.11
3.20	140.36	62.81
3.50	153.03	70.46
3.80	169.28	78.35

Cuadro No. 18. Diferencia Porcentual Modelos HABTAE para Squalius Pyrenaicus Alevín

En la comparación con ambos métodos para el estadio adulto se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 838.91% para el Geométrico y de 109.41% para el Factor Mínimo, mientras que el menor error se presenta en el mayor caudal siendo de 17.17% para el Factor mínimo y de 63.05% para el Geométrico. Al comparar los errores obtenidos en este estadio para las tres especies, se encuentra que el menor error se obtiene en la especie *Squalius Pyrenaicus*, en especial en los errores del método Geométrico.

En el estadio juvenil se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más bajo, siendo este error igual a 476.23% para el Geométrico y de 94.38% para el Factor Mínimo. El menor error se presenta en caudales diferentes para ambos modelos siendo de 44.99% para el Factor mínimo con un caudal de 3.00 m³/s y de 84.37% para el Geométrico en un caudal de 2.50 m³/s. Al comparar los errores obtenidos en este estadio para las tres especies se encuentra que el mayor error se tiene en el *Squalius Pyrenaicus*, difiriendo del estadio anterior (estadio adulto) en el que para esta misma especie se tenía el menor valor de error.

En el estadio Alevín se obtiene que el mayor error se presenta en el caudal más alto para el modelo Geométrico siendo este error igual a 169.28%, mientras que para el modelo de factor mínimo el mayor error se presenta en el caudal de 0.30 m³/s y es igual a 85.28%. El menor error se presenta en el caudal de 1.00 m³/s para ambos modelos, siendo de 45.38% para el Factor mínimo y de 87.99% para el Geométrico. Al observar el comportamiento obtenido para los errores se observa claramente un comportamiento diferente al que se ha presentado en los demás estadios y las demás especies.

d. Resultados generales

Al observar los resultados obtenidos para todas las especies y todos los estadios se obtuvieron como resultados generales las siguientes observaciones:

- La modelación que muestra los resultados más optimistas en cuanto a porción de hábitat en todos los escenarios, es la modelación Geométrica (“Geometric Mean”), haciendo que este modelo se descarte y se busque el más crítico.
- La modelación que presenta el modelo más crítico en todos los escenarios es el Estándar (“Standard Calculation”), por lo que se considera como el modelo más crítico por que presenta la menor porción de área disponible para la especie. Por esta razón, este modelo será implementado en el momento de realizar el análisis de sensibilidad posteriormente.
- Al observar las gráficas obtenidas para los diferentes tipos de modelaciones y en los diferentes estadios, se logra determinar que todos los casos presentan comportamientos muy similares en cuanto a la forma. Lo cuál

hace pensar que sin importar el modelo que se aplique la forma de la curva tiene que ser similar en términos generales.

5.2.2. Filtro de Estadios

Como se describió en el capítulo anterior este filtro se realizó mediante la comparación de las curvas de preferencia.

El primer estadio al que se le realizó el análisis fue al Alevín. Sus respectivas figuras se muestran a continuación (Figuras No. 14 -16).

CURVAS DE PREFERENCIA - PROFUNDIDAD
ESTADIO ALEVÍN

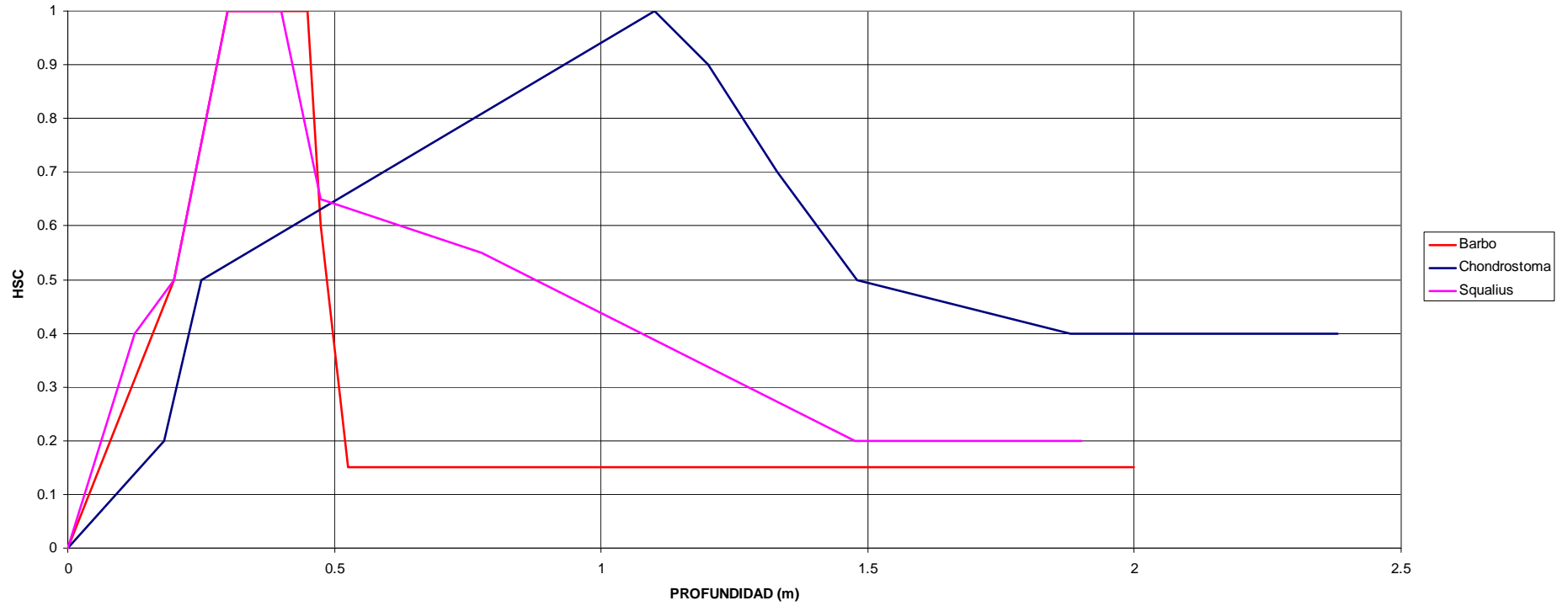


Figura No. 14. Comparación de curvas de Preferencia-Profundidad, Alevin

CURVAS DE PREFERENCIA - VELOCIDAD
ESTADIO ALEVÍN

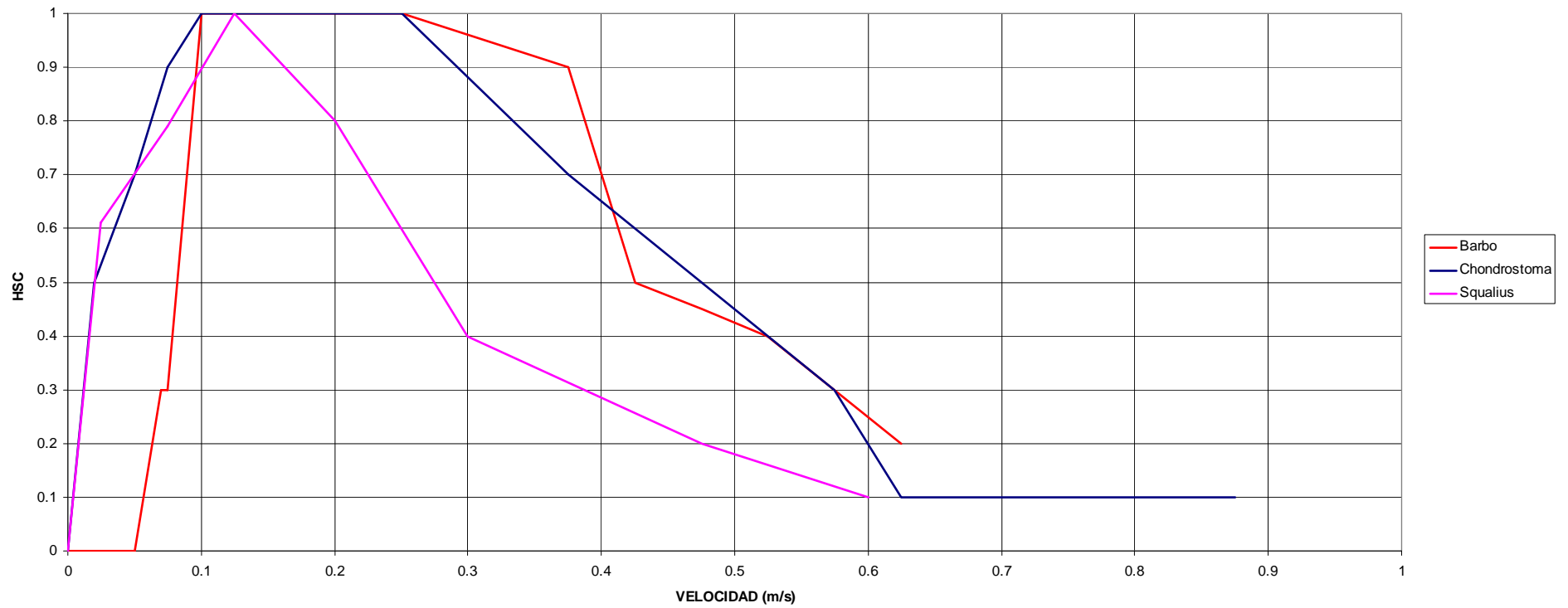


Figura No. 15. Comparación de curvas de Preferencia-Velocidad, Alevin

CURVAS DE PREFERENCIA - SUSTRATO
ESTADIO ALEVÍN

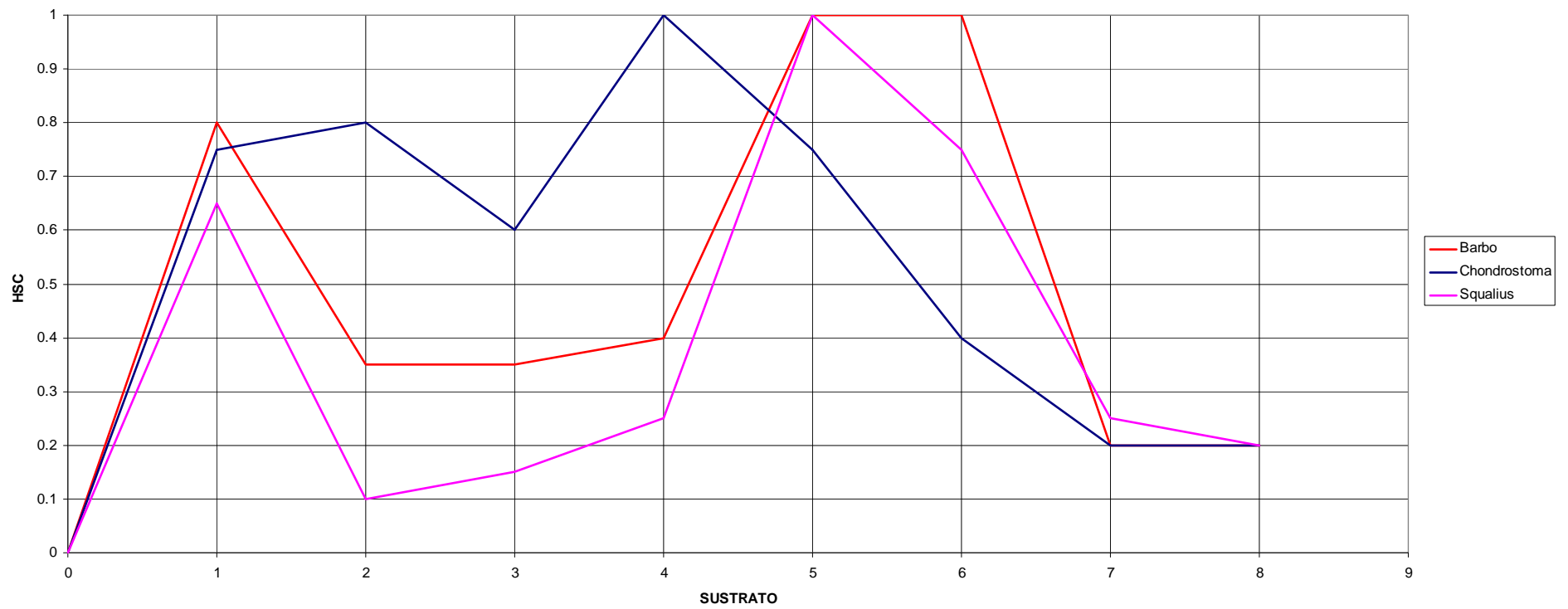


Figura No. 16. Comparación de curvas de Preferencia-Sustrato, Alevin

Al comparar las curvas de preferencia para las diferentes especies se observa que presentan comportamientos similares en su forma. La única curva que presenta una diferencia significativa es la profundidad, esta diferencia se presenta en la especie *Chodrostoma* respecto a las otras dos especies.

El segundo estadio al que se le realizó el análisis fue al Juvenil. Sus respectivas figuras se muestran a continuación (Figuras No. 17 -19).

CURVAS DE PREFERENCIA - PROFUNDIDAD
ESTADIO JUVENIL

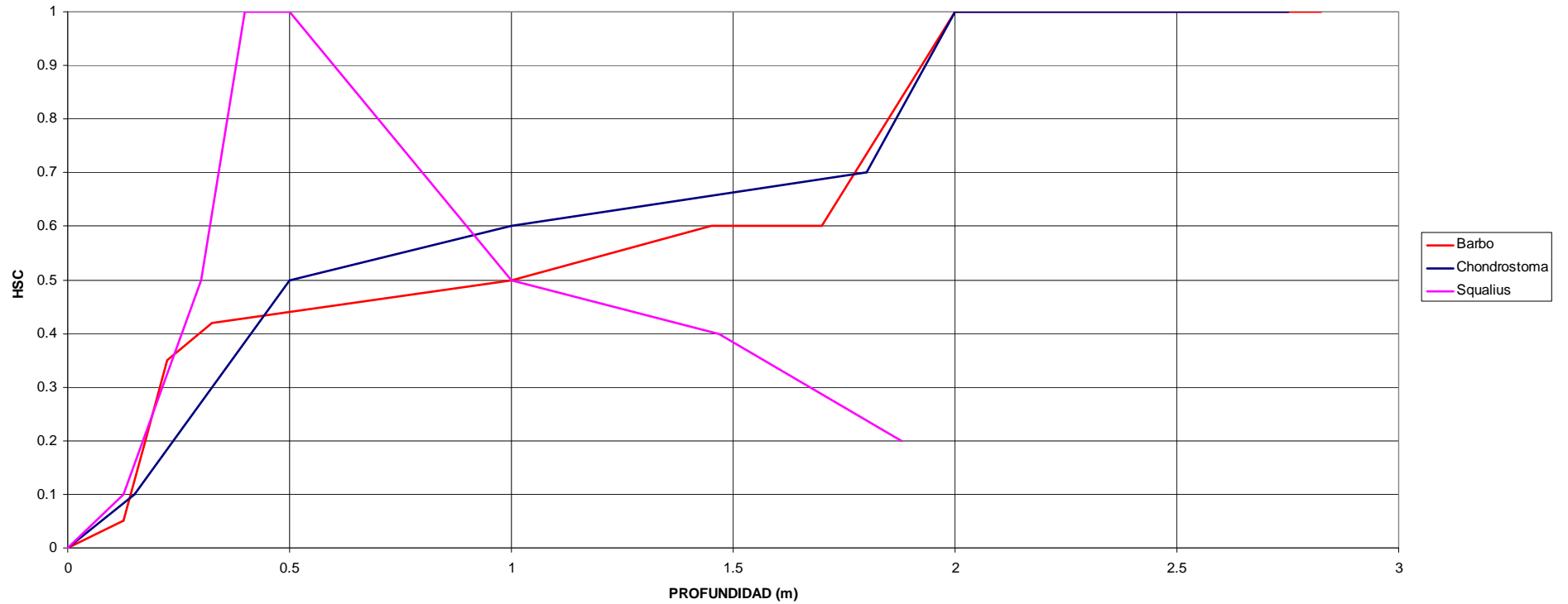


Figura No. 17. Comparación de curvas de Preferencia-Profundidad, Juvenil

CURVAS DE PREFERENCIA - VELOCIDAD
ESTADIO JUVENIL

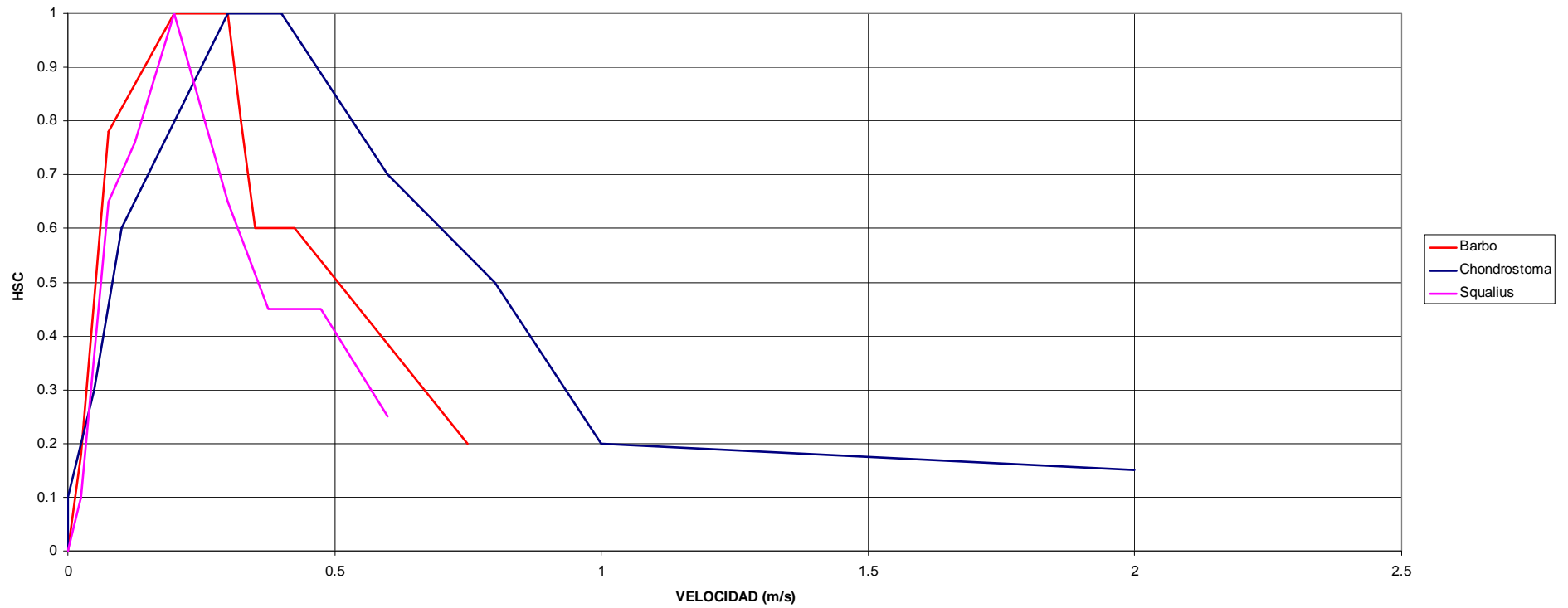


Figura No. 18. Comparación de curvas de Preferencia-Velocidad, Juvenil

CURVAS DE PREFERENCIA - SUSTRATO
ESTADIO JUVENIL

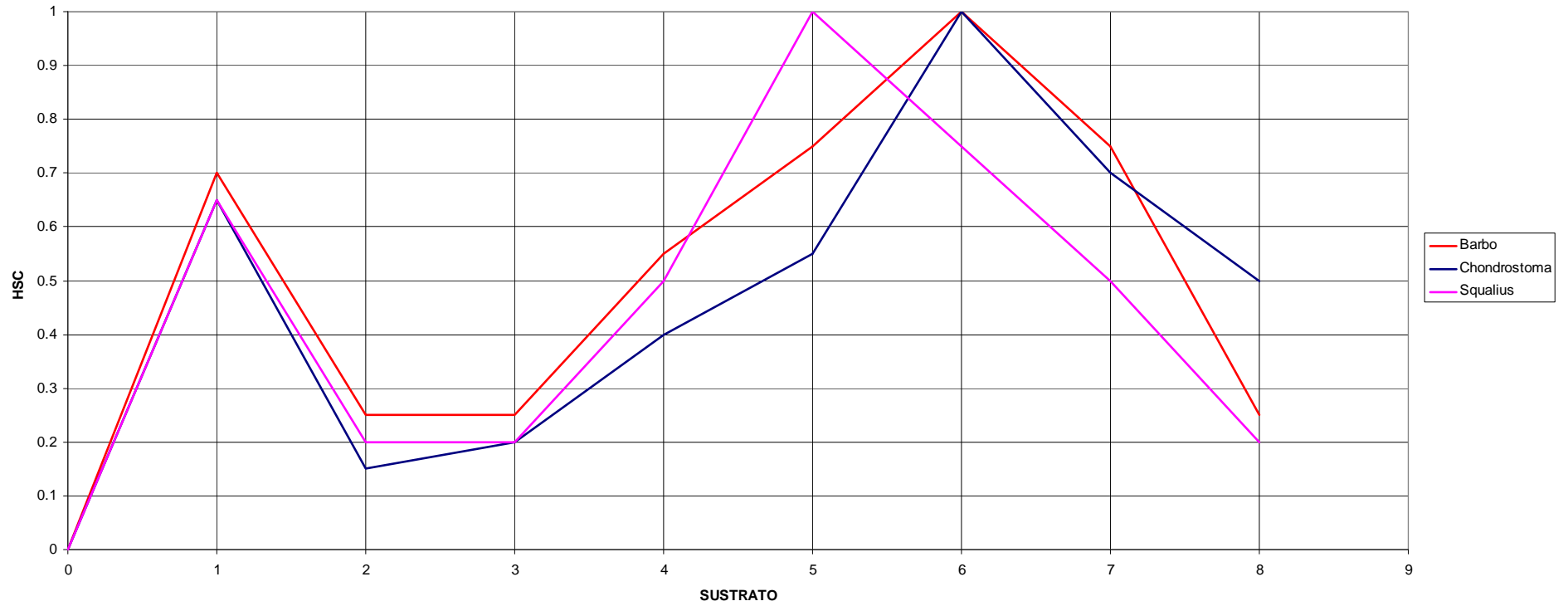


Figura No. 19. Comparación de curvas de Preferencia-Sustrato, Juvenil.

Al comparar las curvas de preferencia se observa un comportamiento similar en la forma de las curvas de velocidad y sustrato. Para la profundidad se observa una diferencia en la forma de la curva de la especie *Squalius*, por que en las otras dos especies se presenta un comportamiento parecido.

El último estadio al que se le realizó el análisis fue al Juvenil. Sus respectivas figuras se muestran a continuación (Figuras No. 20 -22).

CURVAS DE PREFERENCIA - PROFUNDIDAD
ESTADIO ADULTO

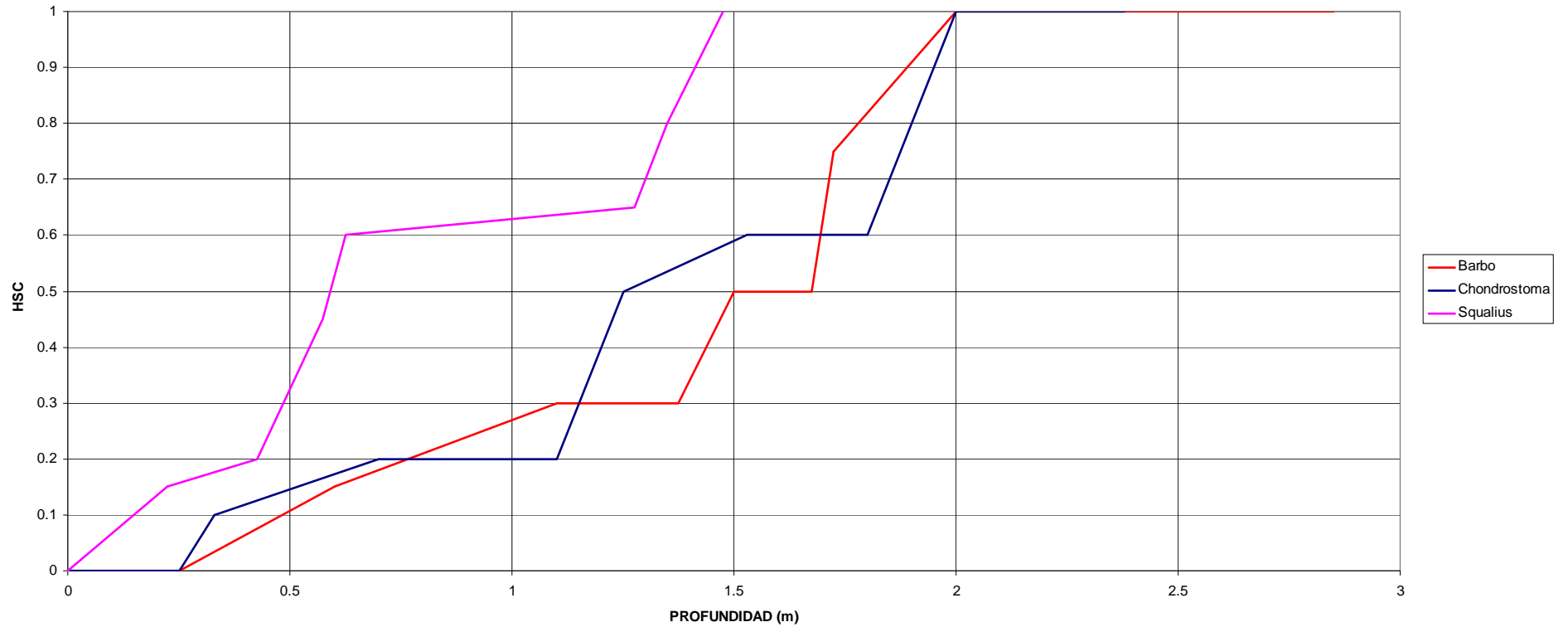


Figura No. 20. Comparación de curvas de Preferencia-Profundidad, Adulto

CURVAS DE PREFERENCIA - VELOCIDAD
ESTADIO ADULTO

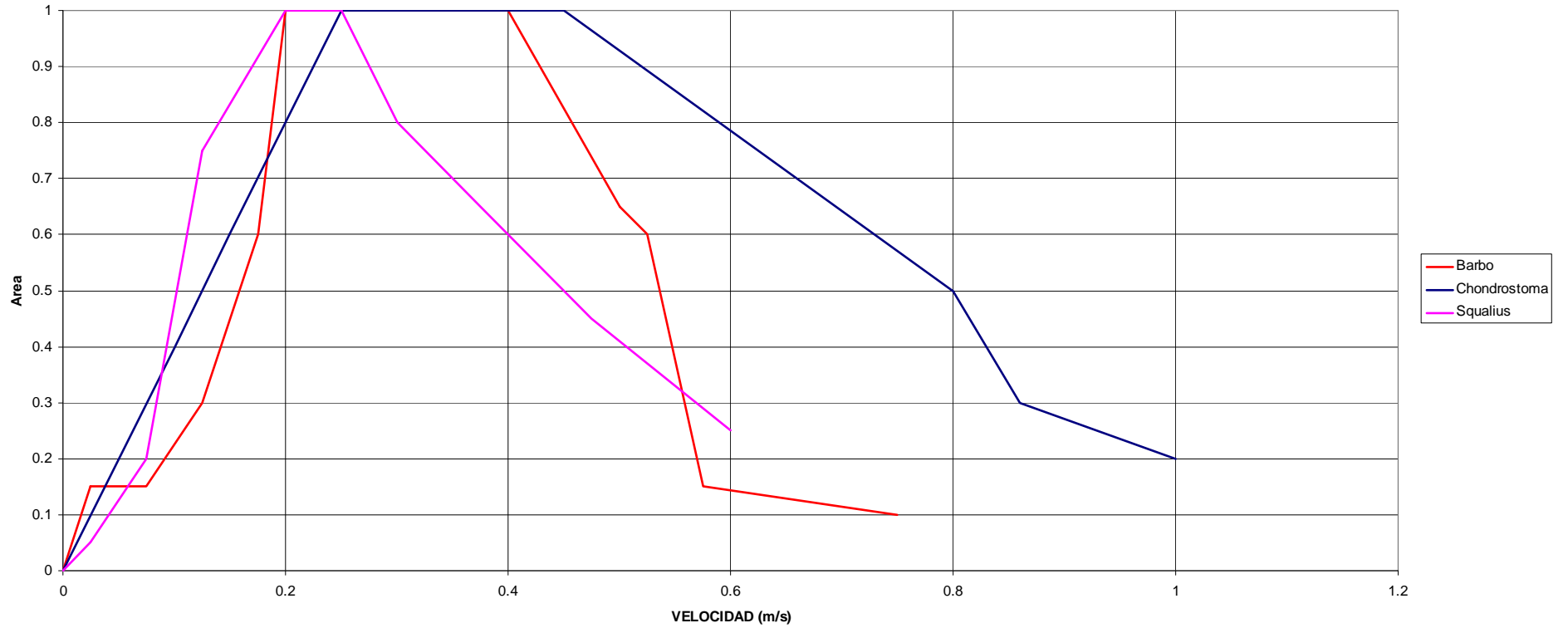


Figura No. 21. Comparación de curvas de Preferencia-Velocidad, Adulto

CURVAS DE PREFERENCIA - SUSTRATO
ESTADIO ADULTO

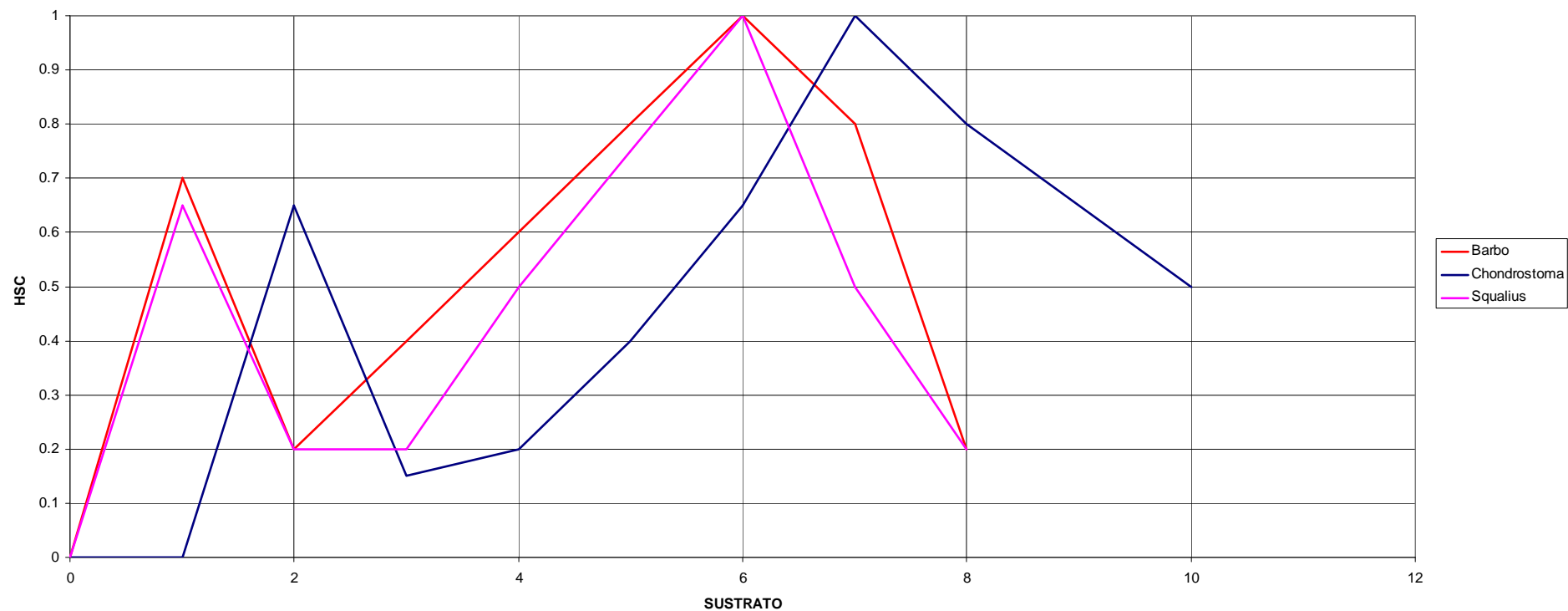


Figura No. 22. Comparación de curvas de Preferencia-Sustrato, Adulto.

A diferencia de los otros dos estadios, en este las características de velocidad, profundidad y sustrato, presentan un comportamiento similar entre todas las especies, mostrando formas muy parecidas. En algunos casos tiene la misma forma pero desfasada o más amplia.

A continuación se realiza un análisis general de las gráficas de las curvas de preferencia:

- En la mayoría de las curvas de preferencia para las diferentes especies se tiene una similitud entre estadios en la forma de las gráficas. A partir de esto se puede llegar a seleccionar una especie específica y un estadio debido a que el comportamiento de las curvas es similar, haciendo que lo importante sea encontrar la curva que presenta mayor variación en los resultados cuando se cambian sus parámetros.
- Al observar los diferentes estadios se observa que el estadio que presenta mayor similitud entre las especies es el Adulto, por lo cuál este será el estadio al que se le realizará el análisis de sensibilidad.
- A parte de la similitud entre curvas que se presenta en el estadio adulto para las diferentes especies, los resultados obtenidos en el numeral 5.1.4 (Procesamiento de la información en el PHABSIM y obtención de las curvas bases), sugieren que en el estadio adulto se presentan las menores porciones de hábitat disponible. Teniendo en cuenta lo anterior, el estadio adulto resulta ser el estadio más crítico en términos de hábitat, por tanto, también resulta ser el estadio escogido para el análisis de sensibilidad.
- Es de vital importancia que la escogencia de un solo estadio no implica que este sea el estadio más importante para la supervivencia de esta especie. Esto solo se hace para poder facilitar el análisis de sensibilidad al programa, principal objetivo de este proyecto.

5.2.3. Filtro de Especies

Como se describió en el capítulo anterior, este filtro se realizó mediante la variación porcentual de las curvas.

Como fue mencionado en el análisis anterior, el estadio que se seleccionó para realizar el análisis de sensibilidad fue el estadio adulto, por lo tanto se decidió realizar la variación de las curvas únicamente para este estadio en las diferentes especies con el fin de determinar cuál especie es más crítica.

La variación de los datos que se realizará será del 10% y del 20% en las curvas de preferencia de las especies en el estadio adulto. A continuación se muestran los resultados porcentuales para las variaciones generadas. Los resultados del

PHABSIM y las curvas que se generan a partir de éstos, se encuentran en el Anexo No. 3.

BARBUS BOCAGEI - ADULTO		
Caudal (m ³ /s)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	
	COMPARACIÓN MODELO ESTÁNDAR CON Variada 10%	Variada 20%
0.20	12.26	25.21
0.30	11.75	24.14
0.50	10.81	22.16
0.70	9.88	20.22
0.90	8.79	17.95
1.00	8.39	17.11
1.10	8.11	16.53
1.30	7.56	15.39
1.50	7.03	14.27
1.80	6.30	12.75
2.00	5.95	12.04
2.50	5.32	10.72
2.81	4.77	9.60
3.00	4.54	9.12
3.20	4.42	8.88
3.50	4.23	8.50
3.80	4.06	8.16
Promedio	7.30	14.87

Cuadro No. 19. Diferencia Porcentual entre las variaciones de 10 y 20%- Barbus Bocagei

Los resultados obtenidos muestran un error máximo de 25.21% y un error promedio igual a 14.87% para una variación del 20% y de 7.30% para la variación de 10%.

CHONDROSTOMA POLYPEPSIS - ADULTO		
DIFERENCIA PORCENTUAL (%)		
Caudal (m ³ /s)	COMPARACIÓN MODELO ESTÁNDAR CON	
	Variada 10%	Variada 20%
0.20	11.12	22.79
0.30	9.89	20.24
0.50	8.59	17.53
0.70	8.12	16.51
0.90	7.71	15.67
1.00	7.55	15.32
1.10	7.35	14.92
1.30	6.99	14.16
1.50	6.75	13.66
1.80	6.44	13.01
2.00	6.26	12.63
2.50	5.69	11.46
2.81	5.43	10.93
3.00	5.28	10.62
3.20	5.17	10.39
3.50	4.99	10.02
3.80	4.71	9.46
Promedio	6.94	14.08

Cuadro No. 20. Diferencia Porcentual entre las variaciones de 10 y 20%- Chondrostoma Polypepsis

Los resultados obtenidos en la tabla anterior muestran un error máximo de 22.79% y un error promedio igual a 14.08% para una variación del 20% y de 6.94% para la variación de 10%.

SQUALIUS PYRENAICUS - ADULTO		
DIFERENCIA PORCENTUAL (%)		
Caudal (m ³ /s)	COMPARACIÓN MODELO ESTÁNDAR CON	
	Variada 10%	Variada 20%
0.20	12.53	25.25
0.30	10.68	21.72
0.50	8.03	16.31
0.70	6.64	13.45
0.90	5.46	11.05
1.00	4.94	9.99
1.10	4.56	9.21
1.30	4.00	8.08
1.50	3.67	7.40
1.80	3.31	6.67
2.00	3.09	6.23
2.50	2.69	5.42
2.81	2.51	5.05
3.00	2.41	4.85
3.20	2.31	4.65
3.50	2.18	4.38
3.80	2.06	4.14
Promedio	4.77	9.64

Cuadro No. 21. Diferencia Porcentual entre las variaciones de 10 y 20% - Squalius Pyrenaicus

Los resultados obtenidos muestran un error máximo de 25.25% y un error promedio igual a 9.64% para una variación del 20% y de 4.77% para la variación de 10%.

Al comparar los valores de error se obtiene que el mayor error se presenta en el Squalius Pyrenaicus pero es muy similar al del Barbus Bocagei, siendo de 25.25% y 25.21% respectivamente. Al ser tan cercanos es difícil definir cuál es más crítico por lo tanto se tomará el mayor promedio como variable decisoria. El mayor promedio se presenta en el Barbus Bocagei con un error promedio igual a 14.87% en la variación del 20%. Con esto se define que la especie que es más sensible a un es Barbus Bocagei, siendo así la especie crítica y la que se debe modelar en el análisis de sensibilidad.

A partir de esto se define que el análisis de sensibilidad se le realizará al Barbo adulto.

La escogencia de una sola especie no quiere decir que esta sea la más importante de la zona de estudio. La escogencia del barbo sólo se hace por que es la especie que presenta la mayor sensibilidad, convirtiéndola en una especie representativa

para el análisis que se desea analizar en este proyecto y que se muestra a continuación.

5.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad, dividiéndose en los pasos propuestos en la metodología.

5.3.1. Generación de combinaciones.

En esta parte del análisis se generaron todas las combinaciones posibles variando las curvas de preferencia en 1%, 5% y 10% hacia arriba y hacia abajo. El número total de combinaciones que se obtuvieron fue de 343 combinaciones incluyendo la combinación básica.

5.3.2. Procesamiento mediante PHABSIM.

Después de generada cada una de las combinaciones, el paso siguiente fue introducirlas en el software para obtener la curva de Caudal vs. Hábitat por cada combinación. Con lo anterior fue posible elaborar la envolvente de sensibilidad, objeto de estudio de esta investigación.

Como se dijo en la metodología, las modelaciones con el PHABSIM se realizaron manualmente, por cada modelación se gastaban alrededor de 2 minutos 20 segundos, y al multiplicar por el número de combinaciones se obtiene un tiempo total de 13.40 horas en las corridas del modelo. Los resultados de estas 343 combinaciones se encuentran en el Anexo No. 4.

5.3.3. Envolventes de sensibilidad.

En esta parte del proyecto se realizó el análisis de sensibilidad al programa a partir de las 343 variaciones que se describieron con anterioridad.

Los resultados se mostrarán por rangos de variación.

a. Rango de -1% a 1%.

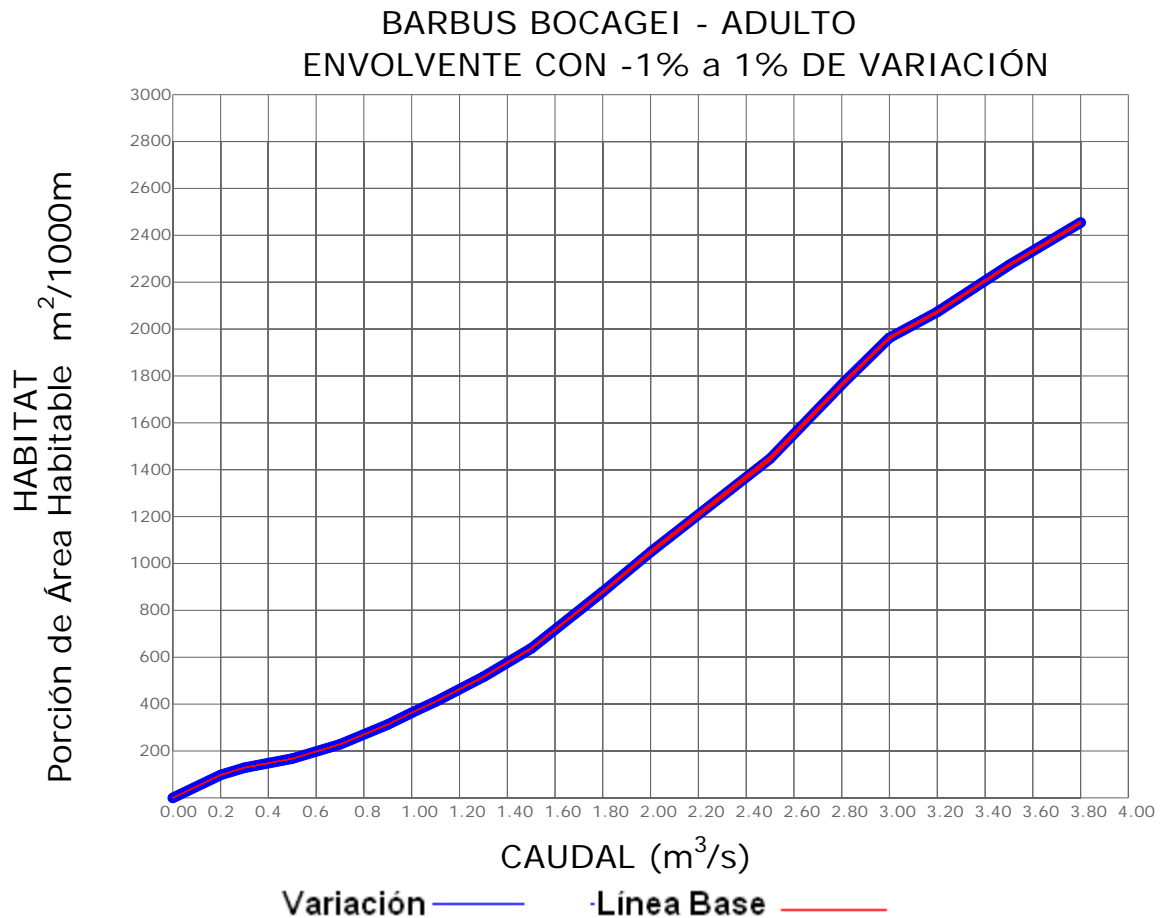


Figura No. 23. Envolvente variación -1% a 1% Barbus Bocagei Adulto

Para la franja de sensibilidad paramétrica correspondiente a las variaciones generadas entre -1 y 1%, se observa que la forma de las curvas variadas es idéntica a la curva base, pero desplazada hacia arriba o hacia abajo según sea el caso.

Esto se debe a que un aumento o disminución en un parámetro genera un cambio proporcional en la gráfica obtenida como resultado, de acuerdo al modelo Estándar del cálculo del hábitat, que es una multiplicación simple, de ahí la proporcionalidad.

En la gráfica parecen sólo existir 3 líneas creadas por la variación de datos entre -1% y 1%, siendo esta apreciación incorrecta debido a que son muchas líneas las que forman esta envolvente pero en repetidas ocasiones estas líneas se sobreponen unas sobre otras quedando ubicadas en los mismos puntos.

Cabe anotar que en esta franja se logra observar un límite superior y uno inferior los cuales se muestran en el Cuadro No. 22.

VALORES MÁXIMOS DE VARIÓN ENTRE 1% Y -1%
JUNTO CON SUS ERRORES RELATIVOS

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)			Error relativo (%)		Desviación estándar (m ² /1000m)
	Base	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	97.90	97.92	97.83	0.023	-0.069	0.05
0.30	128.93	128.91	128.91	0.013	-0.013	0.01
0.50	167.87	167.87	167.83	0.002	-0.022	0.02
0.70	228.69	229.37	227.98	0.299	-0.309	0.70
0.90	313.26	313.48	312.99	0.071	-0.085	0.25
1.00	363.60	363.89	363.28	0.081	-0.087	0.31
1.10	411.21	411.88	410.50	0.164	-0.172	0.69
1.30	516.33	517.98	514.64	0.320	-0.327	1.67
1.50	637.90	640.01	635.75	0.331	-0.337	2.13
1.80	879.67	883.10	876.20	0.390	-0.394	3.45
2.00	1049.27	1055.06	1043.45	0.552	-0.554	5.80
2.50	1447.38	1455.86	1438.86	0.586	-0.588	8.50
2.81	1773.67	1780.95	1766.36	0.411	-0.412	7.30
3.00	1963.60	1969.30	1957.86	0.290	-0.292	5.72
3.20	2073.28	2078.76	2067.75	0.264	-0.267	5.51
3.50	2272.86	2278.21	2267.47	0.236	-0.237	5.37
3.80	2454.76	2460.55	2448.94	0.236	-0.237	5.24
			Promedio	0.236	-0.245	

Cuadro No. 22. Valores de Variación Para el Rango del -1 al 1%

Como se puede observar en el anterior cuadro, los errores obtenidos en ningún caso superan el 1%. El hecho de que el error relativo sea negativo hace que la variación de como resultado una curva por debajo de la curva base. Se puede observar como los errores entre el límite inferior y superior son muy cercanos, pero con signos contrarios por lo explicado anteriormente. Los mayores errores que se presentan están en el límite inferior de la franja.

Comparando la desviación estándar de la línea base y los resultados de las diferentes variaciones, se puede ver que a medida que aumenta la descarga los datos presentan una mayor desviación hasta encontrar un máximo en la descarga de 2,50 m³/s, luego disminuye para descargas mayores.

Al obtenerse valores tan pequeños de error se puede decir que un error de medición del 1% o de incertidumbre en las curvas de preferencia, no tiene gran efecto sobre la curva resultado.

b. Rango de -5% a 5%

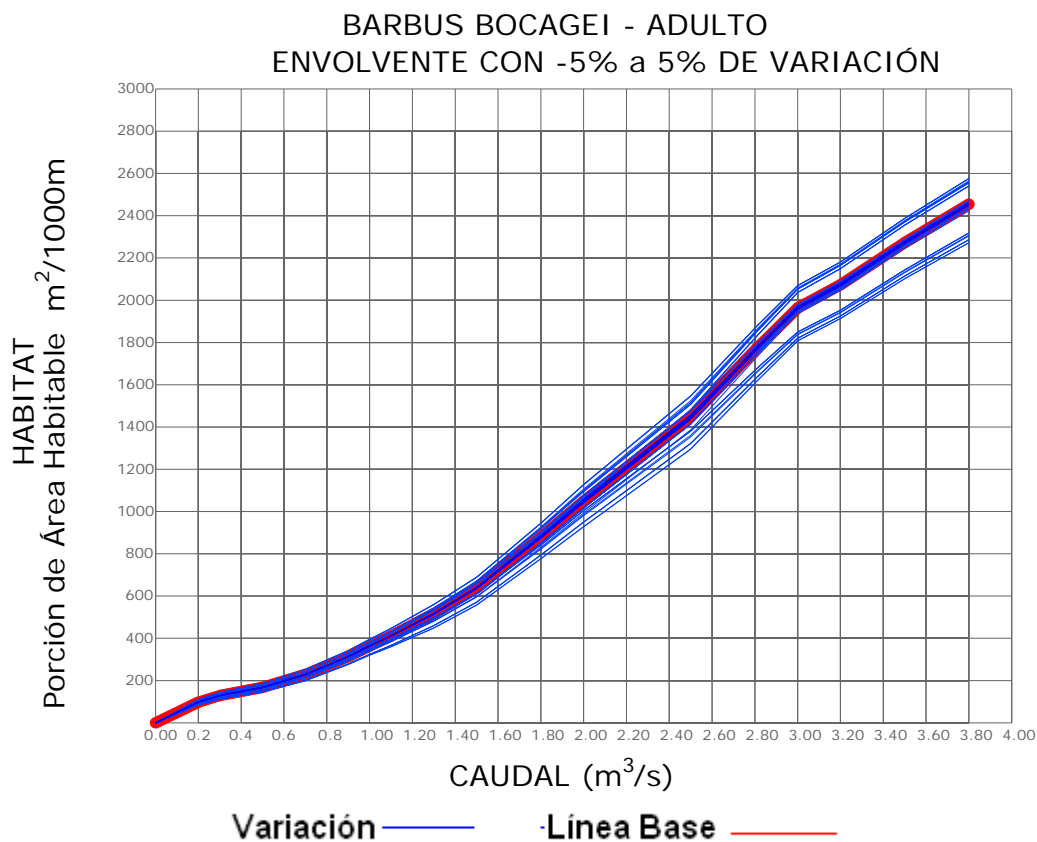


Figura No. 24. Envolvente variación -5% a 5%, Barbus Bocagei

Al observar la curva anterior se distinguen tres franjas principales, una que se encuentra arriba de la curva base, otra que se encuentra sobre la curva base y la tercera que está por debajo de la curva base. Al igual que en la variación del -1 a 1%, hacia arriba y hacia abajo las curvas mantienen la misma forma de la curva base, pues como se explicó anteriormente, esto se debe a la forma de calcular el hábitat disponible, que específicamente para los casos estudiados corresponde al método Estándar dentro del modelo HABTAE.

El límite superior e inferior de la envolvente mostrada anteriormente, se muestra numéricamente en el Cuadro No. 23.

VALORES MÁXIMOS DE VARIACIÓN ENTRE 5% Y -5%
JUNTO CON SUS ERRORES RELATIVOS

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable (m ² /1000m)			Error relativo (%)		Desviación estándar (m ² /1000m)
	Base	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	97.90	110.00	91.37	12.360	-6.670	9.45
0.30	128.93	144.08	120.94	11.751	-6.197	11.75
0.50	167.87	186.05	156.99	10.830	-6.481	14.68
0.70	228.69	252.72	212.75	10.508	-6.970	20.12
0.90	313.26	341.31	295.77	8.954	-5.583	22.97
1.00	363.60	394.85	342.94	8.595	-5.682	26.13
1.10	411.21	446.36	385.83	8.548	-6.172	30.40
1.30	516.33	559.78	481.02	8.415	-6.839	39.45
1.50	637.90	688.74	596.03	7.970	-6.564	46.43
1.80	879.67	945.01	831.00	7.428	-5.533	57.21
2.00	1049.27	1127.36	993.07	7.442	-5.356	67.44
2.50	1447.38	1546.67	1385.84	6.860	-4.252	81.15
2.81	1773.67	1878.19	1732.49	5.893	-2.322	75.11
3.00	1963.60	2069.05	1936.00	5.370	-1.406	70.22
3.20	2073.28	2180.90	2046.69	5.191	-1.283	71.06
3.50	2272.86	2386.88	2244.75	5.017	-1.237	75.27
3.80	2454.76	2575.78	2422.71	4.930	-1.306	74.26
			Promedio	7.559	-4.436	

Cuadro No. 23. Valores de Variación Para el Rango del -5 al 5%.

En el cuadro se puede observar como los errores varían entre 12.36% y -1.306%, siendo los errores del límite superior claramente mayores a los del límite inferior. El hecho de que el error relativo sea negativo quiere decir que la variación dé como resultado una curva por debajo de la base. Comparando estos errores obtenidos con los de la franja de -1 a 1%, se logra observar un aumento considerable en los errores relativos. A diferencia del caso anterior, los mayores errores se presentan en el límite superior de la franja.

Al igual que en el caso anterior, analizando la desviación estándar se puede observar que a medida que aumenta la descarga, los datos presentan una mayor desviación hasta encontrar un máximo en la descarga de 2,50 m³/s, presentado la misma tendencia de la variaciones de -1 a 1%. De lo anterior se puede inferir que la descarga de 2,50 m³/s es una descarga crítica.

Estos valores de error sugieren que un error de medición del ±5% comienza a presentar variaciones significativas en los resultados, incluso superiores al 10% con respecto a la curva base.

c. Rango de -10% a 10%

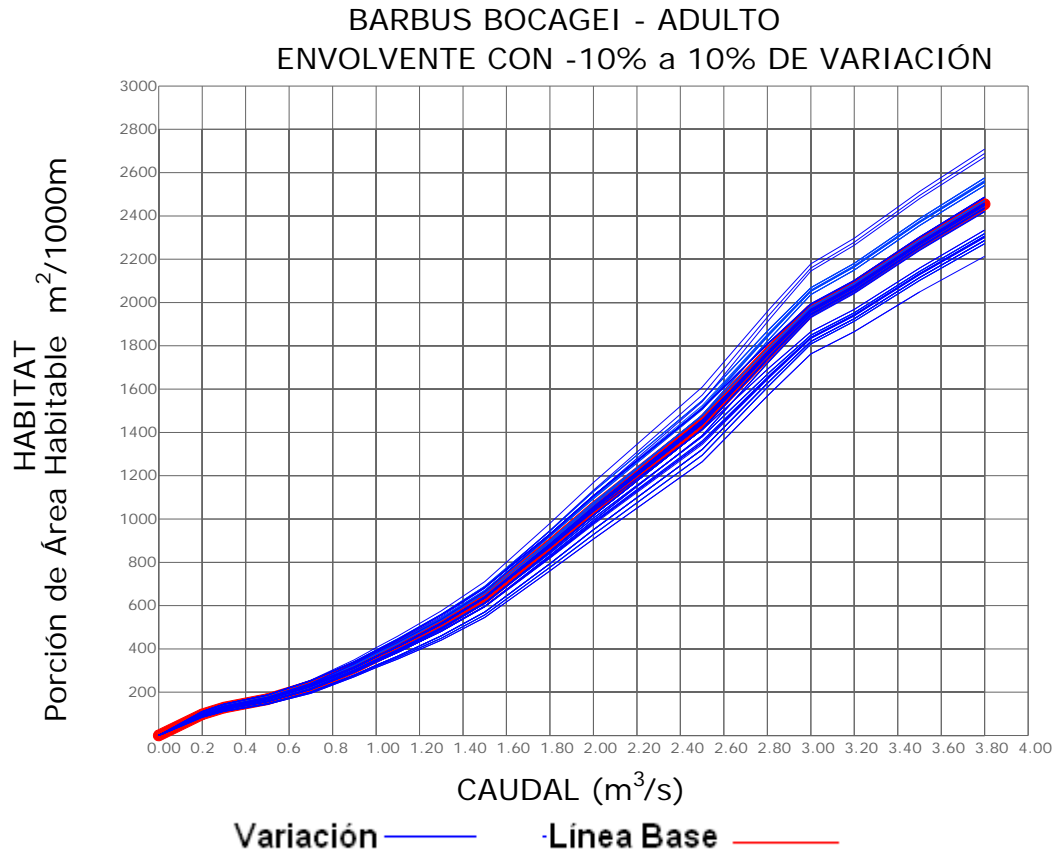


Figura No. 25. Envoltura variación -10% a 10%, Barbus Bocagei

En la franja de sensibilidad paramétrica realizada para la variación de $\pm 10\%$, se diferencian cuatro franjas y el límite inferior. Dos de las franjas se encuentran por encima de la línea base y las otras dos por debajo. Se encuentra que hay dos franjas muy cercanas a la línea base y otras dos retiradas de la misma. La franja más alejada de la línea base es la franja superior. Al igual que en las otras dos variaciones, las curvas generadas conservan al misma forma que la línea base, como es de esperarse según los cálculos que realiza el software PHABSIM (HABTAE - método de cálculo estándar).

VALORES MÁXIMOS DE VARIÓN ENTRE 10% Y -10%
JUNTO CON SUS ERRORES RELATIVOS

Caudal (m ³ /s)	Porción de área habitable			Error relativo (%)		Desviación estándar (m ² /1000m)
	Base	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	97.90	109.82	84.23	12.176	-13.963	12.80
0.30	128.93	144.50	111.37	12.076	-13.620	16.57
0.50	167.87	187.76	144.23	11.848	-14.082	21.79
0.70	228.69	255.42	195.12	11.688	-14.679	30.21
0.90	313.26	349.71	271.01	11.636	-13.487	39.39
1.00	363.60	405.88	314.19	11.628	-13.589	45.89
1.10	411.21	458.94	353.42	11.607	-14.054	52.84
1.30	516.33	575.93	440.34	11.543	-14.717	67.96
1.50	637.90	711.13	545.32	11.480	-14.513	83.09
1.80	879.67	980.47	760.14	11.459	-13.588	110.30
2.00	1049.27	1168.89	907.75	11.400	-13.487	130.72
2.50	1447.38	1610.09	1264.61	11.242	-12.628	172.84
2.81	1773.67	1970.05	1578.06	11.072	-11.029	196.00
3.00	1963.60	2179.17	1762.80	10.978	-10.226	208.23
3.20	2073.28	2297.21	1865.36	10.801	-10.029	215.97
3.50	2272.86	2513.04	2048.82	10.567	-9.857	232.16
3.80	2454.76	2709.01	2213.41	10.357	-9.832	247.83
			Promedio	10.753	-12.077	

Cuadro No. 24. Valores de Variación Para el Rango del -10 al 10%.

En el cuadro se puede observar como los errores varían entre 14.72% y 9,83% (en valor absoluto), siendo los errores del límite inferior claramente superiores a los del límite superior. Comparando los errores que se presentan en el cuadro anterior con los de la franja del $\pm 1\%$, se logra observar un aumento considerable, mientras que respecto a la franja del $\pm 5\%$, el error que se presenta en el límite superior es similar para caudales bajos y para caudales altos difiere alrededor de 6% más. En el límite inferior se observan grandes diferencias; como en el primer caso, los mayores errores se presentan en el límite inferior de la franja total.

En comparación con los análisis anteriores, en la variación del $\pm 10\%$ se puede observar un comportamiento totalmente diferente, en donde no se encuentra una máxima dispersión y luego un descenso, sino una proporcionalidad entre la descarga y la dispersión.

d. Tendencias de los errores promedios y máximos

A continuación se muestran las tendencias de los errores relativos promedio y máximo, obtenidos en el análisis de las tres variaciones en las curvas de preferencia.

En la figura 26 se puede observar un comportamiento polinomial del error promedio positivo, en donde se mantiene un aumento conjunto de la variación de los porcentajes de las curvas de preferencia y el error en el hábitat con una correlación igual 0,981. El gráfico presenta un valor máximo cuando se produce la mayor variación en las curvas de preferencia (10%).

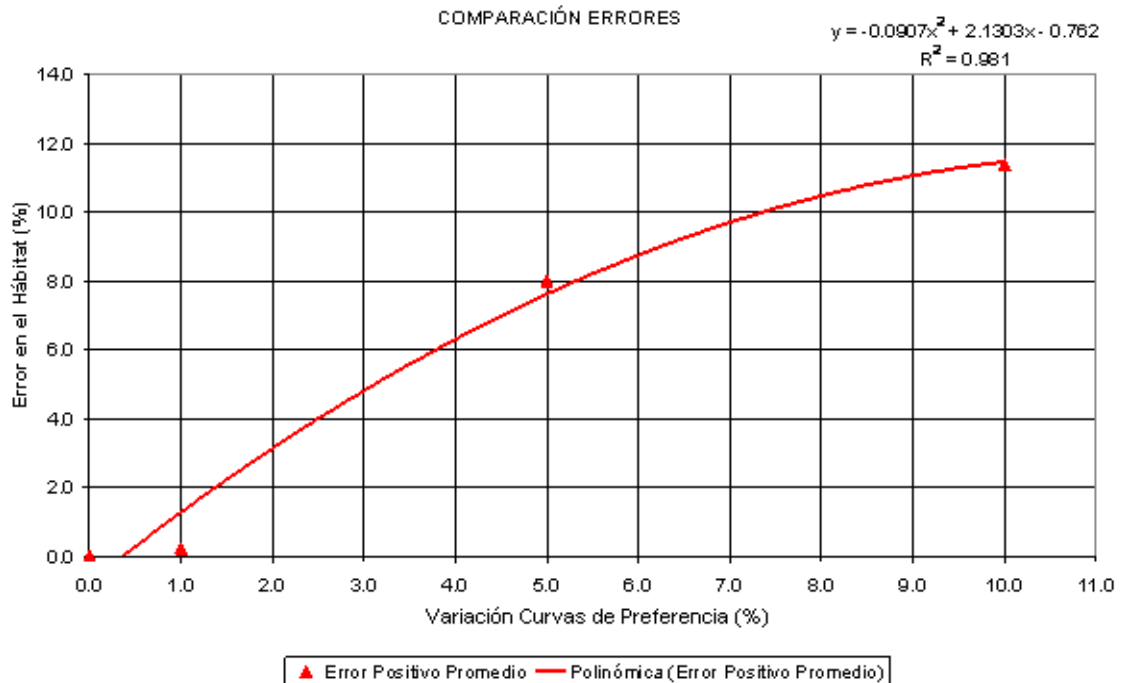


Figura No. 26. Comparación errores Promedio Positivos

En la figura 27 se puede observar que los errores promedio negativos presentan un comportamiento polinomial, en donde se tienen mayores errores de hábitat al aumentar la variación en las curvas de preferencia. La correlación en este caso es igual a 0,999. El gráfico presenta un valor máximo cuando se produce la mayor variación en las curvas de preferencia (10%).

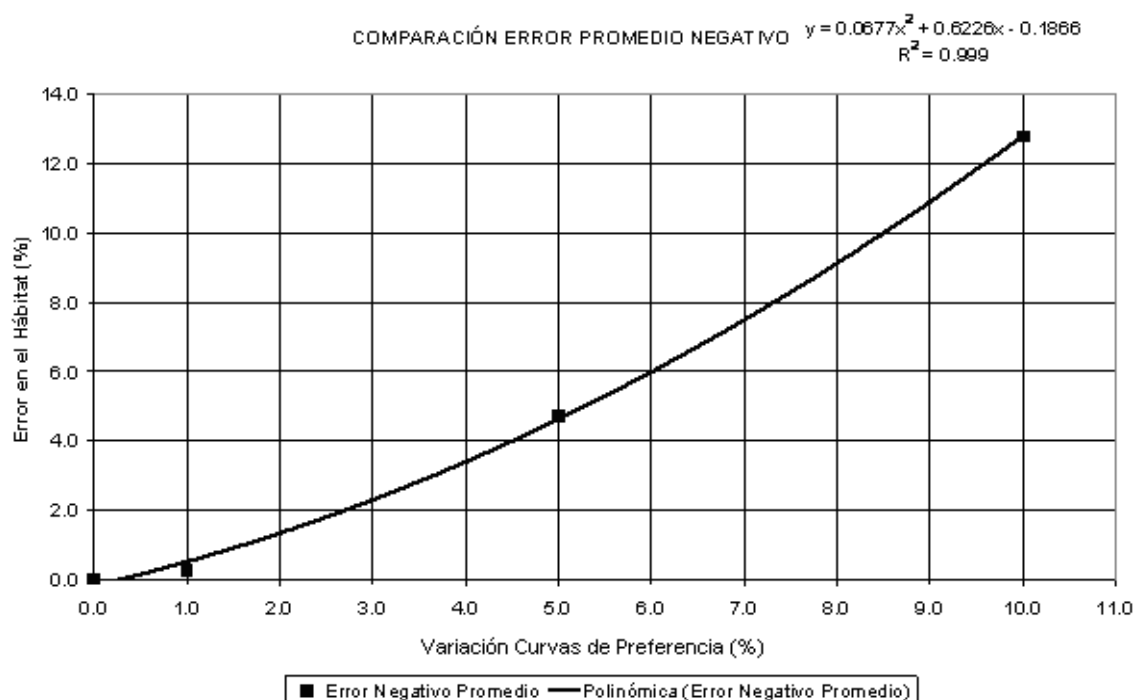


Figura No. 27. Comparación errores Promedio Negativos

En la figura 28 también se observa un comportamiento polinomial para los errores positivos máximos, sin embargo, en este caso es notorio como los errores en la parte inicial de la curva aumentan con respecto al incremento de los porcentajes de variación, y posterior a 5% en la variación de las curvas de preferencia, se observa que el error positivo máximo se mantiene constante, a pesar de que la curva de tendencia sugiera otra cosa. En este caso existe una correlación igual 0,9649.

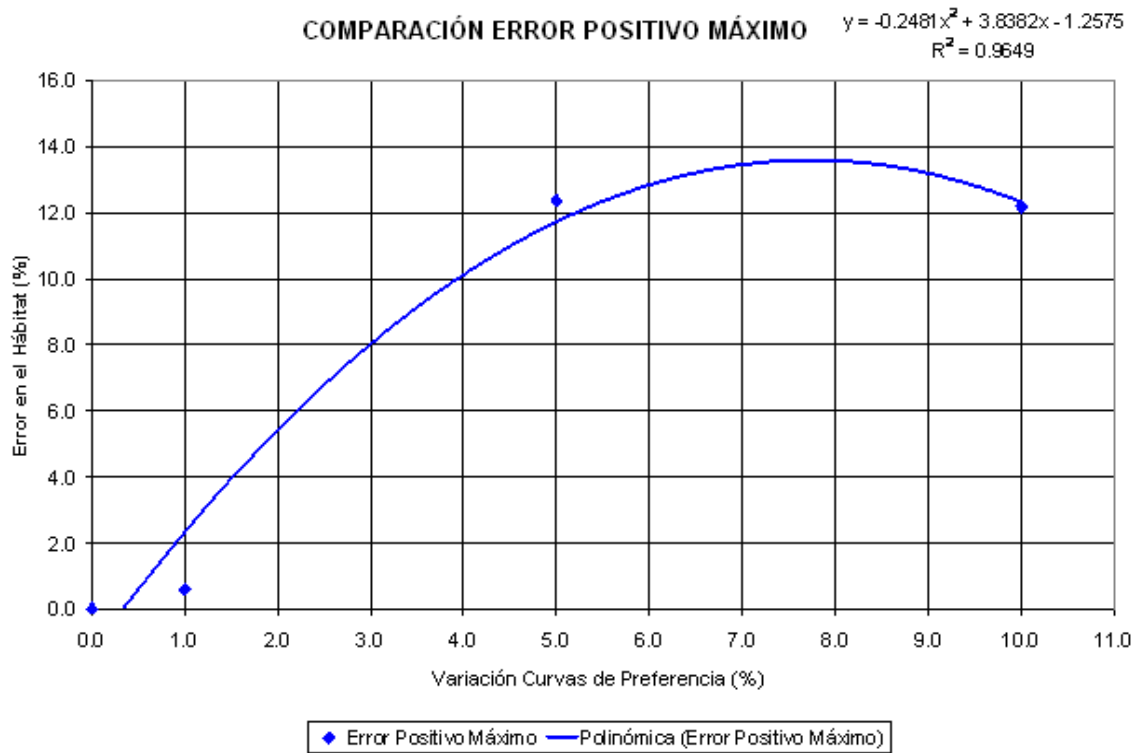


Figura No. 28. Comparación errores Máximo positivos

Un comportamiento polinomial también caracteriza los errores negativos máximos, como se puede observar en la figura 29, no obstante, este comportamiento perfectamente podría ser lineal. La correlación obtenida en este caso fue igual a 0,9981. Es importante resaltar que también se aplicó la tendencia lineal pero ésta dio un coeficiente de correlación logeramente menor al polinomial que se muestra a continuación. El grafico presenta un valor máximo cuando se produce la mayor variación en las curvas de preferencia (10%).

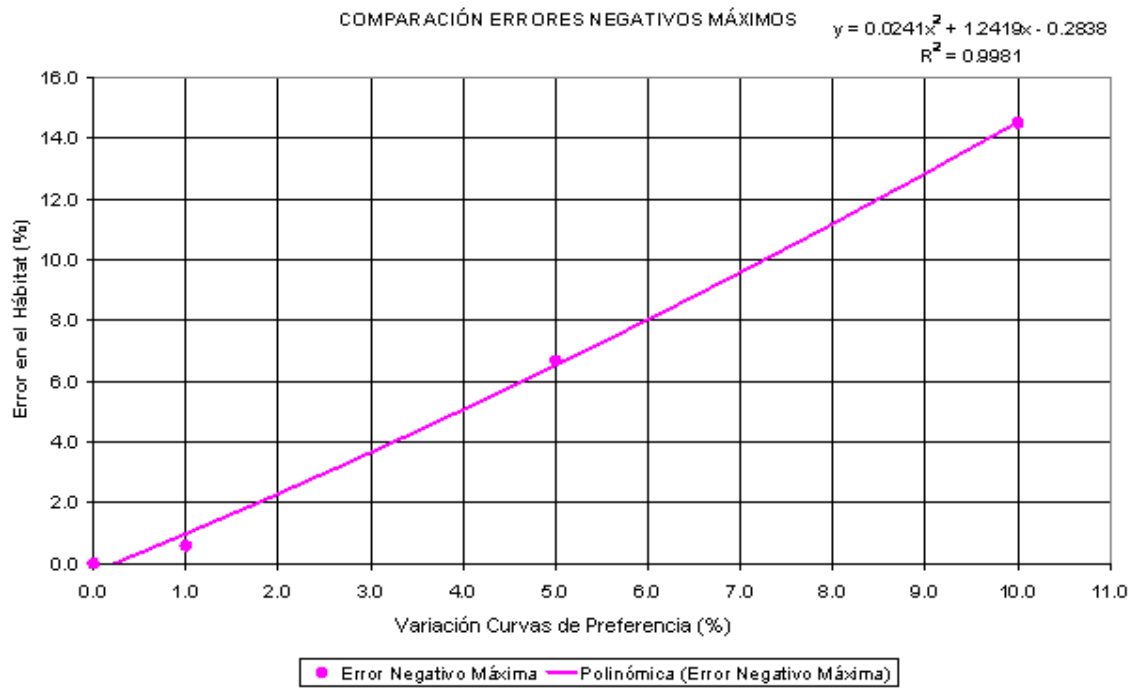


Figura No. 29. Comparación errores Máximo negativos

En la Figura 30 se presentan las cuatro tendencias de los diferentes errores con le fin de llevar a cabo un análisis comparativo entre ellas.

COMPARACIÓN ERRORES

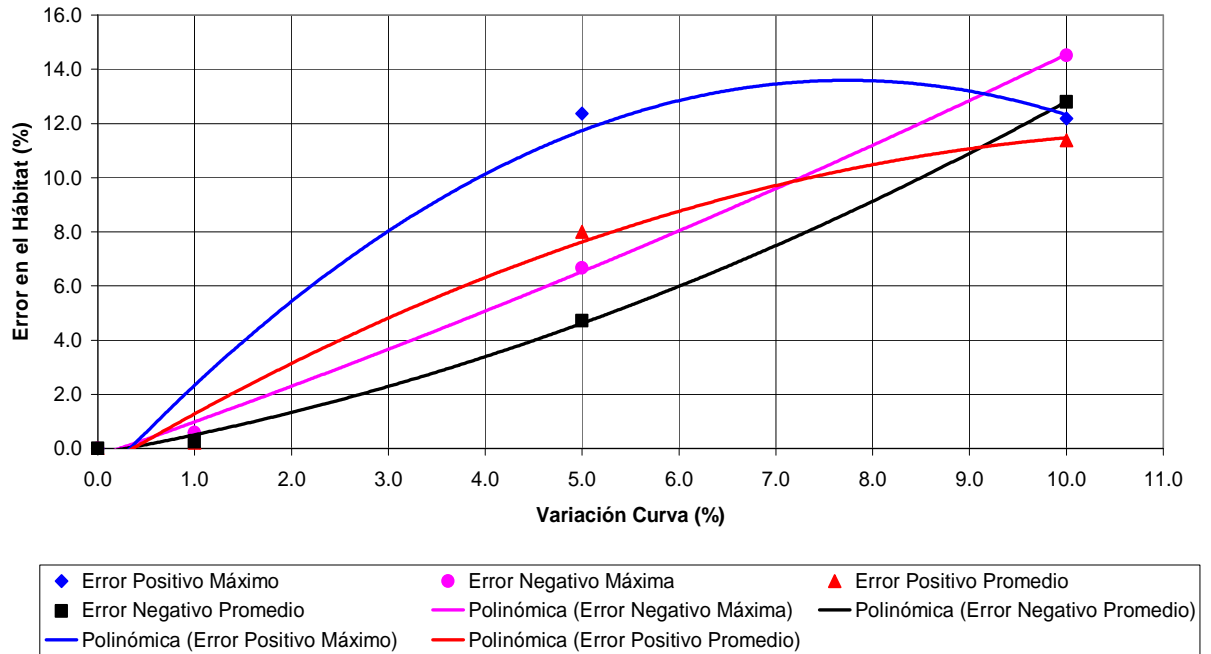


Figura No. 30. Comparación de los diferentes errores promedios y máximos

Comparando las diferentes curvas se pueden observar dos tendencias marcadas. La primera corresponde al error positivo máximo en donde, a pesar de que la tendencia polinomial muestra un máximo intermedio y una disminución al final de la curva, los puntos sugieren una estabilización del error desde una variación del 5% en adelante. La segunda tendencia de curvas corresponde a las tres curvas restantes y sugiere un aumento progresivo del error en función del aumento de la variación en las curvas de preferencia, sin embargo, también es importante destacar que en esta segunda tendencia, las dos curvas de errores negativos son convexas mientras que la curva del error positivo promedio es cóncava.

Nótese como la tendencia de los dos errores positivos es cóncava y la de los errores negativos convexa, lo cual quiere decir que los errores positivos tienden a estabilizarse en función de la variación porcentual, mientras que los negativos siempre tienden a aumentar a medida que aumenta la variación porcentual de las curvas de preferencia.

e. Análisis General

A continuación se presenta un análisis general de las franjas, los resultados obtenidos en los errores relativos y la desviación estándar.

- En el análisis de sensibilidad, todas las variaciones de las diferentes combinaciones respetan la forma de la curva base de Caudal vs. Hábitat pero con un mayor o menor desplazamiento hacia arriba o hacia abajo.
- Como era de esperarse, los errores relativos aumentan a medida que aumenta el porcentaje de las variaciones en las curvas de preferencia. Esto se debe a que la forma de cálculo de las curvas de preferencia depende de una multiplicación simple (HABTAE - estándar): al aumentar o disminuir los valores de las curvas de preferencia, es de esperarse que lo mismo sucede con la curva resultante de Caudal vs. Hábitat.
- Al observar la franja de sensibilidad del $\pm 10\%$ (todas las combinaciones posibles), el mayor se presenta en el límite inferior de la franja. A partir de esto se puede decir que es mejor tener errores en la información biológica (curvas de preferencia) hacia arriba, es decir que sean mediciones mayores ya que mediciones subestimadas generan mayor posibilidad de error.
- Las variaciones del $\pm 1\%$ y el $\pm 5\%$ respecto a la curva base, presentan un comportamiento similar en su desviación estándar, obteniéndose el valor máximo de ésta para un caudal de $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la variación del 10% la desviación estándar aumenta con el aumento del caudal.

5.3.4. Régimen de caudal ecológico

A continuación se muestra la banda de confianza el régimen de hábitat, obtenida a partir del hábitat propuesto combinado con los errores máximos que se obtuvieron anteriormente, es decir con las franjas de incertidumbre.

RÉGIMENES DE HÁBITAT

Condición	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hábitat Natural	2572.00	1782.00	1762.00	1284.00	1297.00	1025.70	516.00	310.50	212.00	316.00	1296.00	2372.00
Hábitat Propuesto	1929.00	1336.50	1321.50	963.00	972.75	769.28	387.00	232.88	159.00	237.00	972.00	1779.00
Límite Superior	2117.08	1484.18	1467.79	1072.20	1083.45	857.13	431.66	260.00	177.60	264.59	1081.84	1967.04
Límite Inferior	1740.34	1194.30	1169.00	837.33	846.20	665.42	330.42	199.71	136.02	202.80	845.83	1603.59

Cuadro No. 25. Regímenes de Hábitat

RÉGIMEN DE HÁBITAT NATURAL, PROPUESTO Y FRANJAS DE ERROR

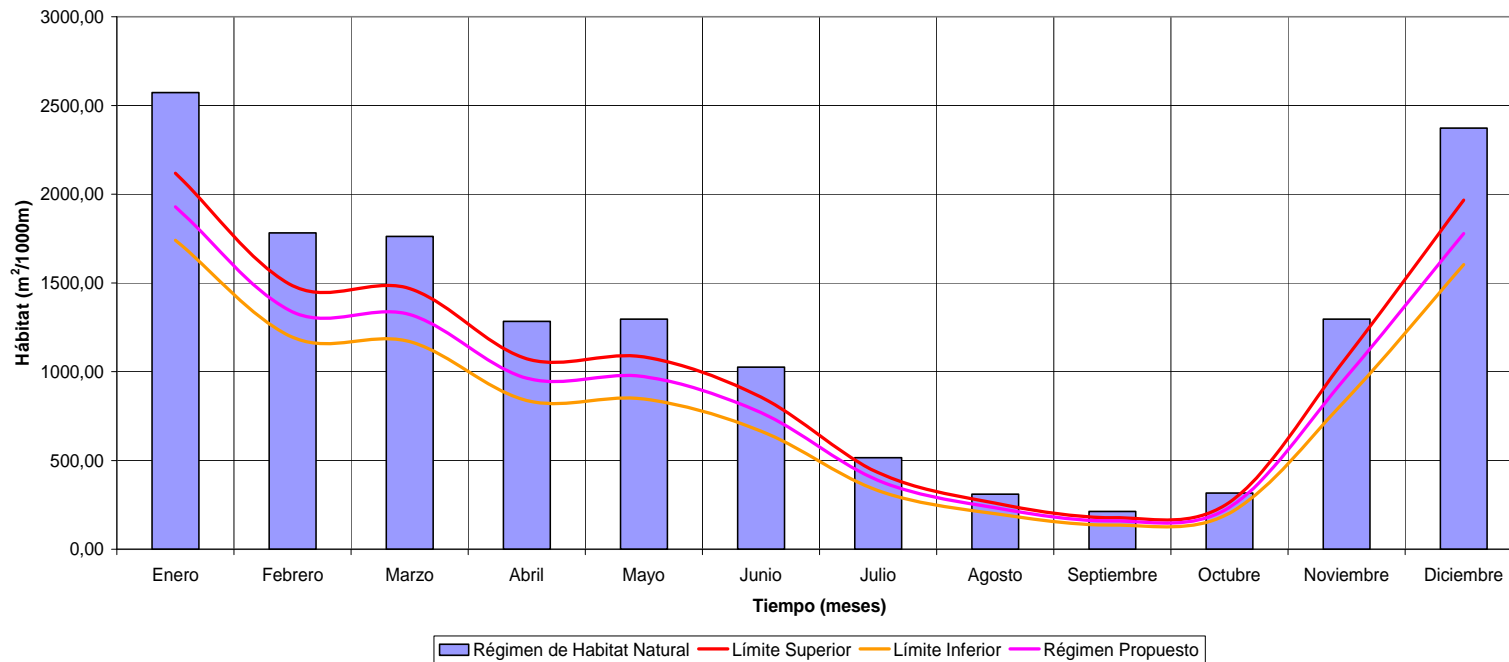


Figura No. 31. Banda de confianza del Régimen de Hábitat.

Originalmente dentro de la metodología IFIM, después de aplicar el PHABSIM viene una etapa de negociación entre los diferentes actores. Debido a que en este caso no se contaba con los diferentes actores, entre otras cosas porque no es objeto de esta investigación, se hizo una suposición referente al régimen de caudales ecológicos: se considera que el 75% del régimen natural de caudales mensuales es óptimo para preservar el hábitat de la especie analizada y su estadio correspondiente (*Barbus Bocagei* Adulto).

A continuación se muestra la banda de confianza del régimen de caudales ecológicos propuesto, obtenida a partir de la banda de confianza del hábitat mostrada anteriormente y las curvas de Q vs Hábitat obtenidas mediante la modelación en el PHABSIM.

RÉGIMENES DE CAUDAL

Condición	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic
Caudal Natural	4.23	2.89	2.77	2.33	2.38	1.95	1.26	0.85	0.58	0.88	2.37	
Caudal Propuesto	2.97	2.36	2.34	1.90	1.91	1.66	1.05	0.71	0.45	0.72	1.91	
Límite Superior	3.25	2.62	2.60	2.11	2.13	1.85	1.17	0.79	0.51	0.80	2.12	
Límite Inferior	2.68	2.11	2.07	1.65	1.66	1.44	0.90	0.61	0.39	0.62	1.66	

Cuadro No. 26. Regímenes de Caudales

RÉGIMEN DE CAUDALES PROPUESTO JUNTO CON SUS FRANJAS DE ERROR

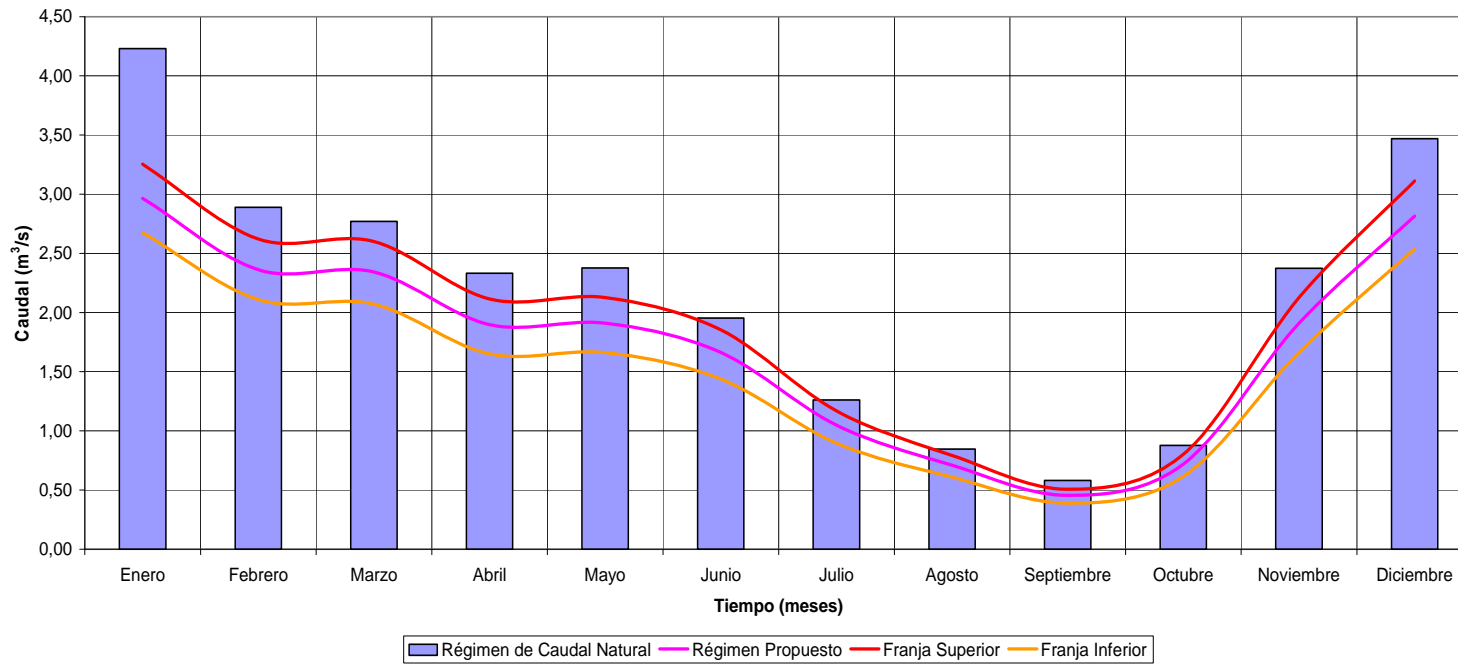


Figura No. 32. Banda de confianza del Régimen de Caudales Ecológicos.

De acuerdo a la gráfica anterior (Figura No. 32), se puede observar que para caudales altos se tiene una mayor amplitud en la banda de confianza con respecto a los caudales bajos. Esto se debe a que los errores obtenidos en términos porcentuales son similares en los dos casos, pero llevados a unidades de caudal dependen de la magnitud del caudal promedio de cada mes, haciendo que en meses de caudales bajos los errores de asignación no sean tan significativos como en meses de caudales altos.

Es importante aclarar que el Régimen de Caudales Ecológicos (RCE) obtenido en este proyecto no es representativo del ecosistema y mucho menos es una propuesta para el manejo de caudales en la corriente analizada, ya que éste se elaboró con base en un estadio de una sola especie y no en función de todas las especies presentes (3 especies con sus respectivos estadios). La idea de llegar hasta el punto de obtener el RCE era mostrar la banda de confianza de los resultados en función del análisis de sensibilidad, por tanto, dicho régimen se elaboró únicamente con fines ilustrativos. Adicionalmente para la obtención de un RCE dentro de la metodología IFIM, es necesario llevar a cabo una etapa de negociación que en este caso no se efectuó por la ausencia de los actores con sus respectivos regímenes de caudales y porque no se desarrolló una propuesta de caudales ecológicos con base en todas las especies del ecosistemas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones a la luz de los objetivos propuestos para esta investigación.

- En este proyecto se evaluó el desempeño del Software PHABSIM (Physical Habitat Simulation System), a partir de las curvas de preferencia de tres especies reales. La escasez de información de parámetros ecológicos se interpretó como una franja de incertidumbre de dichas curvas, con lo cual se pudo evaluar el desempeño y la sensibilidad del PHABSIM en función de la incertidumbre ecológica.
- En este proyecto se aplicó el software PHABSIM a un hidrosistema español con tres especies representativas y sus respectivos estadios. Cabe anotar que al poseer curvas de preferencia de un proyecto real, no fue necesario generar estas curvas a través de la simulación de Montecarlo. A partir del proceso de filtración se obtuvo que las curvas de preferencia del estadio adulto y la especie *Barbus Bocagei* eran las más indicadas para realizar el análisis de sensibilidad, debido a que en dicho estadio las curvas de preferencia presentan una mayor similitud en su comportamiento y la especie *Barbus Bocagei* presenta una mayor sensibilidad de los resultados en función de la variación de sus parámetros ecológicos.
- De acuerdo con lo anterior se establecieron las franjas de incertidumbre correspondientes a las tres curvas de preferencia del estadio adulto de la especie *Barbus Bocagei*, a partir de las cuales se obtuvo una banda de confianza en el régimen de caudales ecológicos, que permite determinar el posible error que se tiene en la asignación de caudales ecológicos para el caso analizado.
- Para desarrollar el análisis de sensibilidad se variaron las curvas de preferencia reales de la especie y estadio escogidos en $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$, y se tuvieron en cuenta todas las posibles combinaciones entre estas variaciones, con lo cual el total de combinaciones para desarrollar el análisis fue de 343.
- Dentro de las opciones de modelación HABTAE para el cálculo del hábitat disponible, la opción que presenta las menores porciones de hábitat es "Standard Calculation", haciendo que los resultados que se obtengan a partir de esta opción sean mucho más críticos que las otras dos opciones presentes en este modelo (Geometric Mean y Lowest Factor).
- El análisis de sensibilidad realizado en esta investigación sugiere que para incertidumbres en los parámetros ecológicos del $\pm 10\%$, se obtienen errores en las curvas de Caudal vs Hábitat disponible de hasta el 15%

aproximadamente, lo cual implica un error similar en el régimen de caudales ecológicos del hidrosistema analizado.

- Debido a que la información para la aplicación del PHABSIM se encuentra en inglés, mediante esta investigación se pudo desarrollar una guía en español del funcionamiento del programa, con lo cual se espera una mayor aplicación de la metodología IFIM para el cálculo de caudales ecológicos, en especial, de este software.
- Debido a que en este proyecto las variaciones de las curvas de preferencia se realizaron desplazando las curvas reales hacia arriba y hacia abajo, se recomienda que en análisis posteriores se realice una variación de las curvas punto a punto y no de manera conjunta, con el fin de ampliar el análisis a cualquier tipo de especie. Adicionalmente se recomienda en este caso aumentar el rango del 10% de variación en las curvas de preferencia.
- Se recomienda desarrollar el análisis de sensibilidad del PHABSIM a un hidrosistema local, en el que se tenga en cuenta la escasez de información ecológica (representada en las curvas de preferencia) que hay en Colombia.
- Para investigaciones posteriores se recomienda sistematizar el proceso del análisis de sensibilidad, de tal manera que se pueda efectuar con todas las especies, todos los estadios y punto a punto dentro de las curvas de preferencia, con lo cual se reduciría el tiempo de modelación y se ampliaría el espectro de datos analizados.
- Por último se recomienda analizar los resultados obtenidos en este proyecto en función del fundamento matemático y operacional propio del PHABSIM con el fin de determinar la relación que existe entre la sensibilidad del programa y las expresiones matemáticas del mismo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, K.E., PAUL, E., McCAULEY, L.J., JACKSON, J.R. and Nisbet, R.M., 2006. Instream flow needs in streams and rivers: The importance of understanding ecological dynamics. *Front. Ecol. Environ.* 4(6):309-318.
- ARMITAGE, P.D. Y LADLE, M. 1989. Habitat preference of target species for application in PHABSIM testing. IFE report RT/TO4053K1/1 Para el Institute of Hydrology. Oxfordshire OX, England.
- BOURGEOIS, G., CUNJAK, DANIEL, C., RICHARD, A., 1996. A Spatial and temporal evaluation of PHABSIM in relation to measured density of juvenile atlantic salmon in a small stream. 16: 154-166
- BOVEE, K.D. 1986. Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in IFIM. Instream Flow Paper No. 21, Fort Collins (CO-EEUU).
- BOVEE, K.D. y MILHOUS, R.T. 1978. Hydraulic Simulation in Instream Flow Studies: Theory and Techniques. Instream Flow Paper No.5.
- BROWN, R.P.C. 1989. Environment impact assess of modified flow regimes using PHABSIM. Poster en: IVEM 1989. Technology Transfer in Water and Environmental Management. Birmingham, Reino Unido.
- CAMPO, H.Y.F. y RUIZ, C D.H. 2001. Estimación del Régimen de Caudales Ecológicos en el río Palacé (Cauca). Tesis de Grado Biología, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia,
- CHAPMAN, R.J., HINCLEY, T.M., LEE, L.C., y TESKEY, R.O. 1982. Impact of water level changes on woody riparian wetland communities. USFWS- OBS-82/83. Kearnesysville, EEUU,
- COSTA, M.J., GOMEZ, J.M., BRUXELAS, A. y DOMINGO, M.I., 1988. Efeitos previsivos da construo de barragem de Alqueva sobre a ictiofauna do rio Guadiana. *Revista de Ciencias Agrarias*, Vol XI (4).
- DIEZ, H. J. M. 2004. The Influence of 1D Hydraulic Simulation on the PHABSIM Habitat Index. Proc. Fifth International Symposium on Ecohydraulics. Madrid, España. pp. 12-17.
- DIEZ, H. J. M. 2005. Análisis comparativo de los métodos de simulación hidráulica en PHABSIM-IFIM y su influencia en la evaluación del habitat fluvial. Proquest- Información and learning. España. Pp. 20-25

- DIEZ, H. J. M. 2006a. Análisis comparativo de los métodos actuales de simulación hidráulica en “PHABSIM-IFIM” y su influencia del hábitat fluvial, Valladolid, 2006, pg. 39, Tesis de Doctorado (Universidad de Valladolid). Facultad de Ingeniería.
- DIEZ, H. J. M. 2006b. Modelación fluvial multidimensional aplicada al cálculo de Caudales Ecológicos. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (CD). 15-16/09/2006, Popayán.
- DIEZ, H. J. M. 2008. Curso de introducción e implementación de la metodología IFIM y el software PHABSIM.
- ESPINOZA Carlos, VARGAS, Ximena. Chile, 2001. Metodología Incremental Para la Asignación de Caudales Mínimos Aconsejables, IFIM. , Pág. 7
- FRAGNOUND, E. 1987. Preferences d’habitat de la truite fario (*Salmon trutta fario*). En riviere (*Quelques cours d’eau du Sud-Est de la France*).Tesis Doctoral, laboratoire d’hydroecologie quantitative, Cemafreg. Lyon. 435 pp
- GONZÁLEZ, F, GARZÓN, A, y VILLEGAS, P. 2008. Consideraciones para determinar caudales ambientales en sistemas lóticos y lénticos, XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (Ponencia 12, Mayo 2008).
- GIBBINS, C.N, MOIR, H.J., SOULBY, C. y YOUNGSON, A.F. 2005. Phabsim modeling of atlantic salmon spawning habitat in an upland stream: testing the influence of habitat suitability indices on model output.
- GIPPEL, G.C y STEWARDSON, M.J. 1995. Development of an environmental flow strategy for the Thomson River (Victoria, Australia). Regular River: Research and Management, 10:121-136.
- HAPTOM, M. y M, ACEITUNO. 1988. Direct observation techniques for habitat use criteria development on the Trinity River, Trinity Country, California. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report, 88 (11) : 15-180
- HEGGENES, J.1994. Habitat utilization and preference in juvenile atlantic salmon (*Salmon Salar*) in streams. Regulated Rivers; Research and Management , 5:341-354

- HYRA, R. 1978. *Methods of Assessing Instream Flows for Recreation*. Instream Flow Information Paper No 6, USDI Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-787/34. Fort Collins, Colorado.
- RIVERA, H. DOMINGUEZ, E. MARÍN, R. y VANEGAS, R., Metodología para el calculo del índice de escasez de agua superficial. IDEAM, 2004.
- JHONSON, I.W., ELLIOT, C.R.N, GUSTARD, A., ARMITAGE, P.D., LADLE, M. y BEAUMONT, B 1993. Instream Flow Incremental Methodology using PHABSIM. A tool for setting ecologically acceptable flows. Poster # 1, en: *The ecological basis for river management*. University of Licester. Licester, Reino Unido
- LECLERC, M., BECHARA, J., BODREAU, P. y BELZILEM, L. 1994. Numerical method for modelling spawning dynamics of landlocked salmon (salmon salar). Pp: 562-573, en: Proceedings of the 1st International Symposium on Habitat Hydraulics. Thronnheim, Noruega.
- MARTINEZ, C y GARCÍA L.2002, .Desarrollo de curvas de preferencia de microhábitat para por buceo en el río Jarama (Cuenca del Tajo).Madrid. pág. 74.
- MAYO, R. 2000. Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos adaptación del método IFIM-PHABSIM y aplicación a los ríos españoles. Ingeniería Forestal / E.T.S.I. Montes (UPM).
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA (MAVDT). 2004. Resolución 0865 de 2004 por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el decreto 155 de 2004. Diario oficial N° 45630 de Agosto 4 de 2004.
- MOSLEY, M. 1983. Flow requirements for recreation and wildlife in new Zealand Rivers - A Review. Journal of Hydrology Vol. 22, No. 2, p 152-174,.
- NANCY, P, G. 2005. *Proyecto ley del agua*: por medio del cual se establecen medidas para orientar la planificación y administración del recurso hídrico en el territorio nacional. Pp: 13-14.
- NAIMAN, R. y DECAMPS, H. 1997. "The ecology of interfaces riparian zones". *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28: 621-658.

- NAIMAN, B., BUN, M, McCLAIN. VRÖSMARTY. ZALEWSKI, M., 2007. Ecohydrology- the scientific background to use ecosystem properties as management tools towards sustainability of water resources. *Ecological Engineering* 165: 1-8.
- OBREGÓN., N. N. 2008. Proceso de análisis en ingeniería como estrategia para la profesionalización del docente-ingeniero. *Revista ACOFI*, quinto número, junio de 2008.
- PAYNE, T.R. y DIEZ HERNÁNDEZ, J.M. 2005. Actualización del Modelo RHABSIM 3.0 para estimación de caudales ecológicos. *Revista EIDENAR*, Vol. 111, 1(3), 12-17.
- POFF, N.L. 2004. Natural flow regime as a paradigm for river restoration, a hydroecological context for ecohydraulics. *Proc. V International Symposium on Ecohydraulics*. Madrid.
- SACCARDO, I., PEVIANI, M.A., CROSATO A., GENTILI, G. 1996. Natural/Artificial floods connected with river habitat. Pp: B175-186, en: *Proceeding of the 2nd international symposium on habitat hydraulics*.
- SCHLOSSER, I.J. 1982. Fish community structure and function along two habitat gradients in a headwater stream. *Ecological Monographs*, 52: 395-414.
- SHIRVELL, C.S. y LONGARD, D.A. 1987. Selection of microhabitat in summer by juvenile atlantic salmon (*Salmon Salar*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44.
- SCOTT, M.L., FRIEDMAN, J.M., y AUBLE, G.T. 1996. Fluvial processes and the establishment of bottomland trees. *Geomorphology*, 14, 327-339.
- THARME, R., 2006, *Methods and Tools for Developing Environmental Flow Recommendations*.
- THARME, R., 2008. *Methods and Tools for Developing Environmental Flow Recommendations*. Pp 12-40. Presentación de Powerpoint, Taller Manejando el agua para la gente y la naturaleza: Principios y metodologías de caudales ambientales. Cartagena 4, 5 y 6 de Agosto de 2008.

- THOMAS, PAYNE, STEVEN y DOUGLAS P. 2004. The number of transect required to compute a robust PHABSIM habitat index
- THOMAS, J.A. y BOVEE, K.D. 1993. "Application and testing of a procedure to evaluate transferability of habitat suitability criteria". *Regulated Rivers: Research and Management* 8: 285-294.
- TAYLOR, D.W. 1982 Eastern Sierra riparian vegetation: ecological effects of stream diversion. Mono Basin Research Group Contribution No. 6, Report to Inyo National Forest.
- UNESCO, 2003. Ecohydrology An interdisciplinary approach for the sustainable management of water resourcesm.
- UNESCO, 2007, "Ecohydrology. A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources"
<http://www.hydroecologie.org/index.php?option=article&access=standard&Itemid=129&url=/articles/hydro/pdf/2004/01/hydro04103.pdf>
- WALKER, K.F., SHELDON, F., y PUCKRIDGE, J.T. 1995. A perspective on dryland ecosystem. *Regulated Rivers*, 11, 85-104.
- WILLIAMS, D.D. y HYNES, H.B.N. 1977. The ecology of temporary streams II: General remarks on temporary streams. *Internationale Revue des gesampten Hydrobiologie* 62, 53-61.
- WHITE, R.J., HANSEN, E.A. y ALEXANDER, G.R, 1976. Relationship of trout abundance to stream flow in Midwestern streams. 334-343 (Vol. II), en: Proc. Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs. OSBORN, J.F. y ALLMAN, C.H. (Eds). Am. Fish. Soc. Bethesda, Maryland.
- WHARTON, C.H. y LAMBOU, V.W. 1981 The fauna of bottomland hardwoods in the southeastern United States, en: *Wetlands of bottomland hardwood forests*. Scientific.
- YU, S.L y PETERS E.J. 1997. Use of Froude number to Determine Habitat Selection by Fish. *Rivers*, 6 (1): 10-18.