



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“ESTIMACIÓN DEL HÁBITAT FÍSICO PARA VARIOS CAUDALES,
EN UN TRAMO DEL RÍO LERMA.”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

MARÍA GUADALUPE BOYZO CORREA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EZEQUIEL GARCÍA RODRÍGUEZ

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO DE 2013.



CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	5
1.1 Descripción del problema	9
1.2 ANTECEDENTES	12
1.2.1 Antecedentes en la modelización de la hidrodinámica fluvial aplicada a la simulación del hábitat físico ictiológico, y de la modelización del hábitat	12
1.2.2 La metodología IFIM y el sistema PHABSIM.....	14
2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	20
2.2 Justificación.....	20
2.3 Objetivos	21
3 METODOLOGÍA	22
3.1 Tramo del río Lerma para el estudio	22
3.2. Datos de campo.....	26
3.2.1 Selección de caudales objetivo	26
3.2.2 Ubicación de secciones transversales	27
3.2.3 Ubicación de marcas de referencia en las secciones transversales.....	28
3.2.4 Ubicación del nivel de referencia	29
3.2.5 Topografía	29
3.2.5.1 Obtención de la topografía	29
3.3 Obtención de datos hidráulicos.....	31
3.3.1 Medición de velocidades, tirantes y cálculo de caudales	31
3.3.2 Altura de la superficie libre del agua (ASLA)	33
3.3.3 Pendiente longitudinal	35
3.3.4 Rugosidad (coeficiente “n” de Manning)	36
3.3.5 Registro de datos.....	36

3.4 Obtención de datos de complementarios de hábitat	37
3.4.1 Sustrato	37
3.5 Curvas de preferencia de hábitat	38
3.6 Modelización	41
3.6.1 Sistema PHABSIM	41
3.6.2 Modelización de la Altura de la Superficie Libre del Agua (ASLA).	42
3.6.2.1 Modelos.....	42
3.6.3 Velocidades	45
3.6.3.1 Cálculo de las velocidades de celda	46
3.6.4 Modelización del hábitat ictiológico.....	46
3.6.4.1 Cálculo del Hábitat Potencialmente utilizable (HPU)	49
4 RESULTADOS	51
4.1 Simulación de la superficie libre del agua (ASLA's)	51
4.2 Simulación de velocidades	52
4.3 Simulación del Hábitat Potencialmente Utilizable (HPU)	54
5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	56
6 CONCLUSIONES	67
7 DOCUMENTOS CONSULTADOS.....	70
ANEXOS	74

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por darme la vida, amor y la fuerza de seguir luchando contra las contrariedades de la vida; por haberme ayudado a concluir mi carrera de ingeniero civil en donde deseo

ejercer con gusto y generosidad dando mis servicios a la sociedad y a todo aquel que lo requiera.

A MIS PADRES, Ma. Juana y Guadalupe, por todo su apoyo incondicional en el transcurso de mi vida y mi carrera, por todo el sacrificio que han hecho para que yo crezca como persona, por todo el amor brindado y por la educación que me dieron Dios les llene de bendiciones.

A MIS HERMANOS, Gilberto, Mireya, Luz María, Irma, Janeth, Juan Manuel y Ruben; por todo el apoyo que me han brindado y acompañarme en los momentos de alegría y en los momentos difíciles, por ser personas dispuestas a servir a los demás y por abrirse para contar con ellos siempre en cualquier situación; por ser cariñosos; por darle la alegría y unidad a la familia.

A MI ASESOR, Dr Ezequiel García Rodríguez, por su apoyo brindado durante el trabajo de tesis y por ser una excelente persona; por todo su tiempo y paciencia; por enseñarme y ayudarme a crecer profesionalmente.

A MIS AMIGOS, por ser generosos y brindarme apoyo moral y espiritual, por toda sus oraciones y amistad.

1.- INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El agua ha sido de vital para el desarrollo de la humanidad, es por ello que muchas civilizaciones importantes que han surgido a través de nuestra historia se han establecido en lugares donde se hace presente el vital líquido.

Las grandes civilizaciones se establecieron en Mesopotamia, entre los ríos Tigris y Éufrates. El río Nilo fue fundamental para Egipto, los ríos Amarillo y Azul en China, que juegan un papel importante en el desarrollo de la agricultura. El río Tíber en Roma (Castillo, 2012). En Mesoamérica, los Mayas, los Aztecas y los Toltecas se desarrollaron a orillas ó sobre grandes masas de agua, como ha sido el emblemático lagos Texcoco; algunas otras, en las orillas costeras de los Océanos Pacífico y Atlántico. La generalización del regadío artificial, en las culturas mencionadas, nos permite clasificar como sociedades hidráulicas a dichas formaciones sociales (Luis Vitale, 1983 en Cervantes Servín A. 2011).

La historia de La Piedad, Michoacán, inicia desde antes de la conquista, cuando se establecen asentamientos humanos que se presume de origen Chichimeca y Tarasco; considerando que al parecer, esta región fue frontera entre dichos grupos indígenas. El primer nombre que se conoce de esta localidad es el de Zula “Lugar de Codornices”, para luego ser rebautizada en el mundo prehispánico y bajo el dominio Tarasco, como Aramútaró Tzicuirin “lugar de cuevas pequeñas”. Ya bajo el dominio español, el entonces caserío se denominará en algún momento “San Sebastián Aramutarillo” nombre que daría paso al de “La Piedad” a partir del año 1692, mismo que le fue asignado por don Juan López de Aguirre, quien luego del descubrimiento en 1687 de la imagen del santo Cristo, hizo traer a esta tierra dicha sagrada imagen que vendría a ser bautizada como el “Señor de La Piedad”.

De igual manera, en algún momento y de manera oficial se le denominó “Villa de Rivas”, al obtener el rango de municipio en 1831.

El título de ciudad le fue concedido a La Piedad por la Ley Territorial del 10 de diciembre de 1871, otorgándole el nombre actual de “La Piedad de Cabadas”, el cual constituye un homenaje permanente al párroco, doctor José María Cabadas por su decidida intervención para la construcción del puente sobre el Río Lerma, que une a los estados de Michoacán y Guanajuato, obra iniciada en 1832 y finalizada en 1833 (Plan de Desarrollo Municipal de La Piedad, Michoacán 2012_2015).

La piedad se encuentra al norte del estado de Michoacán, al borde de la ribera sur del Río Lerma, a una altura de 1 680 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de Degollado, Jalisco, y con el de Pénjamo, Guanajuato, siendo el lindero natural el propio Río Lerma con cada una de las entidades federativas (Ilustración 1.1).

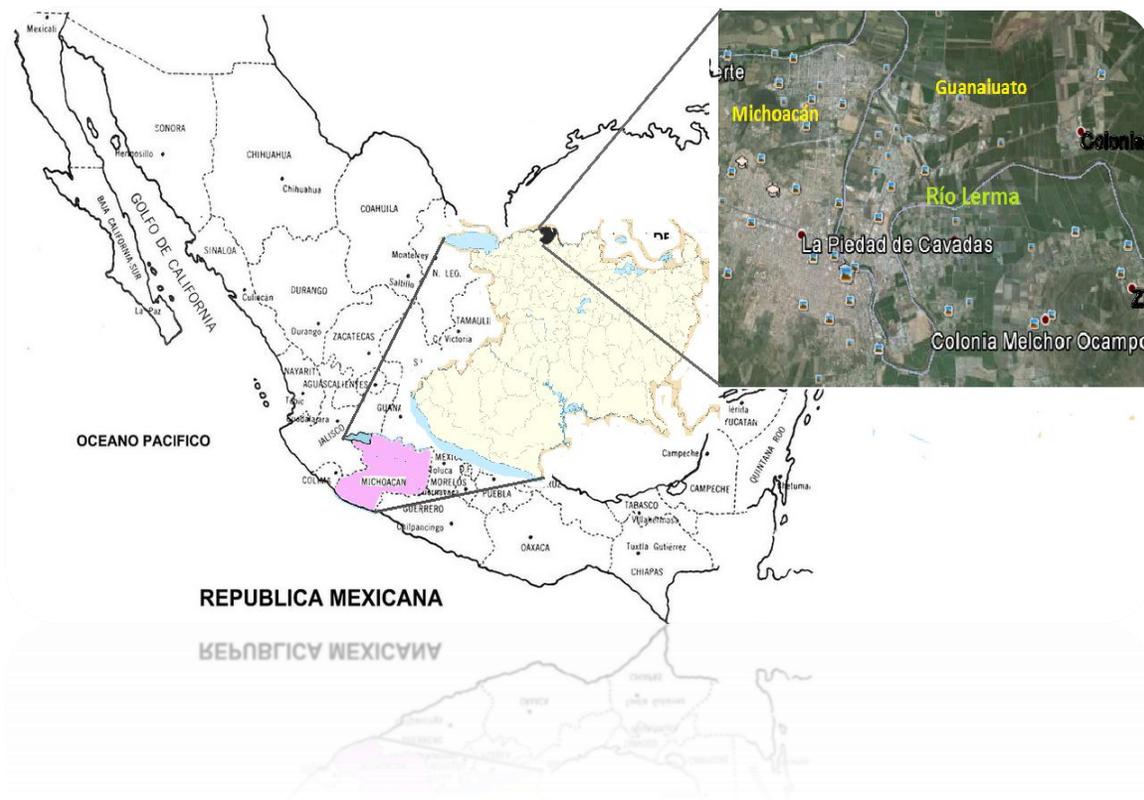


Ilustración 1.1. Ubicación de la ciudad de La Piedad de Cavadas, Michoacán, México.

La cuenca del río Lerma comprende la siguiente área geográfica: el área de captación cuyo colector principal es el río Lerma, incluyendo el lago de Chapala y las áreas de captación de otras corrientes que descargan directamente en él, hasta el sitio denominado cortina de Poncitlán, localizado sobre el tramo inicial del río Santiago, a su salida del lago de Chapala (CONAGUA, 2012).

El agua que fluye por el cauce discurre por las siguientes entidades federativas: Estado de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato y Jalisco. (García y Falcón, 1974 en Bueno-Soria J. *et al.*, 1980).

El Lerma se origina en los manantiales de Almoloya del Rio, en el Estado de México, atraviesa hacia el noroeste del Valle de Toluca, y desagua en el lago de Chapala (Ilustración 1.2), tiene una longitud de 708 km y drena una cuenca de 47.116 km²; Siendo el río interior más largo de México (García y Falcón, 1974 en Bueno-Soria J. *et al.*, 1980).



Ilustración 1.2. Ubicación de la cuenca Lerma-Chapala y de la ciudad de La Piedad de Cabadas, Michoacán, México (García Rodríguez E., 2011).

Este sistema provee de agua potable al Cd de México por medio de un acueducto que atraviesa la Sierra de las Cruces (García y Falcón, 1974 en Bueno-Soria J. *et al.* 1980). El agua del Lerma es un recurso natural básico para las actividades

humanas, y también sirve como fuente para la generación de energía eléctrica que surte a la ciudad de México con 79.000 Kw (Bueno-Soria J. *et al.* 1980).

Por otra parte, el agua del Lerma se utiliza para riego de los cultivos de las zonas agrícolas situadas en sus márgenes, como ejemplo tenemos el Valle de Santiago en el estado de Guanajuato, el cual ocupa un lugar importante dentro de las zonas agrícolas del país. Asimismo, el mismo cuerpo de agua constituye el hábitat de peces comestibles, que son aprovechados por los habitantes de ésta región (Bueno- Soria J. *et al.* 1980). Sin embargo, sus aguas están contaminadas por ser utilizado como canal receptor de desechos por las ciudades que se encuentran en su trayecto y por las zonas industriales de Toluca y Salamanca, recordando que en esta última existe una refinería de petróleo. Aunado a lo anterior, se agrega la contaminación que tiene su origen en el lavado de las tierras de cultivo (Bueno-Soria J. *et al.* 1980 en Cervantes Servín A., 2011).

El río Lerma en el tramo de estudio está intrínsecamente relacionado en su geografía con municipios de dos entidades federativas: La Piedad de Cabadas, Michoacán, y Pénjamo, Guanajuato, específicamente, en Guanajuato, por la población denominada Santa Ana Pacueco. Por lo tanto, el Lerma sirve a su vez como límite territorial para la parte Noroeste de Michoacán y la parte Suroeste de Guanajuato. A continuación se muestra la ubicación espacial del meandro del río Lerma en la Piedad, Michoacán (Ilustración 1.3).



Ilustración 1.3. Tramo de estudio (meandro) del río Lerma en La Piedad, Michoacán.

Descripción del problema

A finales de los años setentas y debido a la problemática de inundaciones que padecía La Piedad, Michoacán y Santa Ana Pacueco, Guanajuato, durante las crecidas del río Lerma, fue construido un dren de alivio de aproximadamente 2.8 kilómetros de longitud (Ilustración 1.4). Dicho dren se mantiene en funcionamiento aunque con problemas en sus compuertas (CIIDIR, 2004 en CONACYT 2007)



Ilustración 1.4. Meandro del río Lerma, con la ubicación de compuertas, plantas de tratamiento y arroyos. (García Rodríguez E., 2011)

De la investigación efectuada en septiembre de 2003 por parte del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) denominado “Evaluación física, química y biológica del río Lerma (meandro) a la altura de la ciudad de La Piedad, entre los estados de Guanajuato y Michoacán” (CONACYT 2007), en su parte de resultados, se mencionan los problemas más importantes con referencia al deterioro sanitario. En los últimos años, los índices de enfermedades en la población infantil se han incrementado, la zona ocupa uno de los primeros lugares en el mundo en incidencia de neurocisticercosis, y debido al uso desmedido de insecticidas en los hogares, por la abundancia de mosquitos, se presenta el problema de leucemia (Ayala Ortiz D., y Abarca Guzmán F. 2012).

Hoy, el lecho del Lerma en la zona de estudio alcanza el rango de foco infeccioso de alto riesgo (CIDIR 2004 en CONACYT 2007).

El aumento de la contaminación en el meandro del Río Lerma en La Piedad Michoacán, se da en la época de estiaje, debido a la falta de un caudal natural del Río, pues en esta época se encuentra prácticamente seco, circulando únicamente las aguas negras descargadas por los habitantes de la ciudad, provocando así una mayor contaminación y en consecuencia los problemas de salud en las personas, como antes se mencionó.

Otro problema importante que se presenta en el meandro del Lerma, en la zona de estudio, es la modificación del régimen de caudales debido a la desviación de sus aguas por el dren de alivio antes mencionado, razón por la que los caudales que circulan por el meandro del Lerma, en época de estiaje, son prácticamente nulos, presentándose, en consecuencia, la modificación drástica del hábitat físico fluvial.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Antecedentes en la modelización de la hidrodinámica fluvial aplicada a la simulación del hábitat físico ictiológico, y de la modelización del hábitat.

Al proyectar las obras hidráulicas se debe tener en cuenta su impacto en el medio fluvial y la necesidad de utilizar medidas que lo mitiguen, como es el caso del mantenimiento de un régimen de caudales que garantice su continuidad y, en la mayor medida posible conserve y/o genere características de hábitat que favorezcan su conservación y desarrollo adecuados (García-Rodríguez, E. *et al.*, 2008)

Estas son tan abundantes en los ecosistemas fluviales que, en la actualidad, son pocos los ríos cuyos caudales no están regulados artificialmente.

Por ello, la Gestión del Agua y de los recursos biológicos con ella relacionados debe enfrentarse con frecuencia a la problemática que estas obras originan y en concreto cuantificar los caudales circulantes mínimos capaces de mantener los ecosistemas de los ríos regulados (García de Jalón D. y Gonzales del Tango M., 1998).

El uso de las obras hidráulicas origina una regulación artificial de caudales que afecta profundamente a la fauna reófila, no ya por las grandes fluctuaciones de nivel provocadas (la mayoría de ellas mucho más dramática que las debidas a la torrencialidad natural), sino también por el desfase temporal en que ocurren respecto a la fenología natural (Ward y Stanford, 1979; Petts, 1984, en Cervantes Servín A., 2011).

La atención de los diferentes usos del agua se debe dar dentro de un marco de respecto a los ecosistemas asociados, con la finalidad de lograr el desarrollo

sustentable de los países. Para tal fin, en lo que se refiere a las corrientes superficiales, se determinan regímenes de caudales ecológicos mediante metodologías que permiten evaluar los requerimientos hídricos para que los organismos que habitan tal ecosistema cuenten con las condiciones adecuadas para su desarrollo (Stalnader, 1982; en Tharme R.E., 2003), al mismo tiempo que se aporta información importante para determinar la disponibilidad del recurso hídrico para otros usos (*e.g.*, agrícola, pecuario e industrial) (García- Rodríguez E. y Ochoa-Franco L.A., 2008).

Investigadores de instituciones públicas y privadas de varios países han realizado esfuerzos encaminados a diseñar y/o aplicar metodologías para determinar la cantidad de agua necesaria para el mantenimiento del ecosistema fluvial: Arthington *et al.* (2004), Bovee *et al.* (1998), García de Jalón (2003), García *et al.* (1999), Gore *et al.* (1988), Jowett (1998), Cubillo *et al.* (1990), Mathur *et al.* (1985), Martínez (2000), Parasiewicz y Dunbar (2001), Tennant (1976) y Tharme, (2003), entre otros (en García Rodríguez E., 2011); las metodologías que más se han utilizado en el ámbito mundial (Tharme, 2003; Reiser *et al.*, 1989; en García-Rodríguez E., y Ochoa-Franco L.A., 2008) son las de Tennant (basada en datos hidrológicos) y la IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). En esta última, la simulación del hábitat fluvial es una herramienta fundamental (García- Rodríguez *et al.*, 2008). “Entre la diversidad de enfoques propuesto para evaluar los regímenes de caudales ecológicos, el más utilizado y aceptado científicamente es la conocida metodología <<Intream Flow Incremtnal Methodology>> (IFIM)” (Díaz-Hernández J.M., y Ruiz-Cobo D.H., 2007 en Cervantes Servín A. 2011).

“The Instream Flow Incremental Methodology”, (IFIM) por sus siglas en ingles y al cual en lo sucesivo llamaremos IFIM, fue desarrollado por la Biological Resources Division del (USGS) “United States Geological Survey” (División de Recursos

Bilógicos, de la oficina de estudios geológicos de Los Estados Unidos de América). La metodología IFIM ha estado presente de una forma u otra desde 1980, y se puede encontrar ya, en 1982, un primer escrito “A guide to analysis using the Instream Flow Incremental Methodology”, este documento es conocido como: “Instream Flow Information Paper 12”, publicado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América (Bovee, 1982 en Bovee *et. al.*, 1998).

“IFIM es uno de los instrumentos más utilizados en el mundo para evaluar los efectos de la modificación de los caudales de los ríos y su efecto en el hábitat correspondientes. Es al mismo tiempo uno de los más malinterpretados y, en algunos casos mal utilizados (Bovee *et al*, 1998). En este trabajo de investigación se utilizará la metodología IFIM, y particularmente para la modelación del hábitat se empleará su Sistema de Simulación del Hábitat Físico (Physical Habitat Simulation System), conocido como PHABSIM, por sus siglas en inglés.

1.2.2 La metodología IFIM y el sistema PHABSIM

En la actualidad, la metodología más utilizada y aceptada científicamente para determinar regímenes de caudales consensuados que garanticen un estado ecológico determinado en las aguas superficiales es la IFIM (“Instream Flow Incremental Methodology”), desarrollada por el Departamento de Pesca y Vida Silvestre de EEUU (“USFWS”; Bovee y Milhous, 1982; en Díez Hernández J y Martínez de Azagra A. 2012), como una técnica estándar para evaluar el efecto de una variación de caudal en el hábitat acuático. Además de haber sido concebida con una vocación multidisciplinaria y progresiva, IFIM es una herramienta altamente cooperativa e incremental, que favorece la gestión integrada de cuencas con un claro enfoque ecológico (Payne, 1995; en Díez Hernández J y

Martínez de Azagra A. 2012): de hecho, la Corte Suprema de EEUU emplea IFIM desde hace años como un método válido para negociar el uso del agua superficial (Stalnaker *et al.*, 1995; en Díez Hernández J y Martínez de Azagra A. 2012). Desde los primeros estudios que se efectuaron en España (García de Jalón et al., 1989 y en Portugal Costa, 1988; en Díez Hernández J y Martínez de Azagra A. 2012), se ha utilizado la metodología IFIM.

La metodología IFIM incluye una serie de elementos de tipo técnico y social que apoyan la tarea de análisis y selección de alternativas de manejo de caudales ecológicos o mínimos en un curso de agua. Algunos de estos elementos son: el análisis institucional, la definición de las áreas o zonas incluidas en estudios IFIM, y el desarrollo de curvas de preferencia de hábitat para sistemas y especies definidas (Departamento Conservación y Protección de Recursos Hídricos Chile., 1998).

La modelación convencional del hábitat fluvial en IFIM se desarrolla en su componente principal PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System"; Bovee, 1982 en Díez Hernández J y Martínez de Azagra A. 2012). El PHABSIM reúne varios modelos hidráulicos unidimensionales de profundidades y velocidades, cuyas predicciones en las secciones transversales representativas se combinan adecuadamente con los criterios de preferencia de las variables que determinan el hábitat para los diferentes organismos y/o estadios de vida, con objeto de generar las relaciones funcionales entre el Caudal y un Índice de Idoneidad Relativa del Hábitat (Payne, 2003) en el tramo estudiado. Normalmente, se utiliza como Índice de Hábitat la "Superficie Ponderada Útil" ("Weighted Usable Area"), que consiste en una idoneidad conjunta ponderada por el área de cada celda de simulación, si bien existen otras agregaciones que utilizan el perímetro o el volumen (Díez Hernández J y Martínez de Azagra A. 2012).

Debemos tener claro que IFIM y PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) no son sinónimos. Mientras que IFIM es una metodología general que permite

abordar el problema de la gestión del agua con consideraciones hidrobiológicas, PHABSIM es un modelo específico, diseñado para calcular un índice de la cantidad de hábitat disponible en función del caudal circulante. Sin embargo, no cabe la menor duda de que PHABSIM es una de las herramientas más poderosas de las que dispone la metodología IFIM.

El modelo PHABSIM se compone de seis grupos de programas: (1) hidráulicos, (2) de intercambio, (3) del hábitat, (4) de manejo de curvas de preferencia, (5) de dibujo y (6) otros programas de soporte. Cada grupo de programas es independiente de los otros, sin embargo, el análisis del hábitat precisa de la utilización conjunta de los programas hidráulicos, los de intercambio y los programas de evaluación del hábitat. Los programas de soporte permiten preparar los datos para su evaluación por PHABSIM y modificar los datos según sea necesario (García de Jalón y Mayo-Rustarazo M., 2000).

El modelo PHABSIM tiene dos componentes principales, el primero es el relativo al comportamiento hidráulico del cauce y el segundo el relativo a las necesidades de hábitat de la especie considerada. Las bases de este modelo consisten en realizar una simulación física del hábitat y correlacionarla con los efectos inducidos sobre las poblaciones acuáticas, especialmente piscícolas (García de Jalón y Mayo-Rustarazo M., 2000). Para integrar dichos componentes se emplean modelos para la simulación de la hidrodinámica fluvial y del hábitat, que son alimentados con datos hidrométricos, biológicos y geomorfológicos, tomados directamente del río en estudio, de tal manera que para cada caudal se determina la disponibilidad de hábitat potencialmente utilizable por los organismos acuáticos objetivo, y se construyen gráficos caudal-hábitat para determinar el caudal que maximiza el hábitat potencialmente utilizable. Este caudal constituye una referencia básica para determinar el régimen de caudales ecológicos o

ambientales. En la parte biológica se asume que el hábitat será utilizado por las especies acuáticas de acuerdo con lo conveniente que resulte para su desarrollo, por lo tanto es necesario conocer sus preferencias para poder desarrollar modelos que las reflejen en la mayor medida posible (García- Rodríguez, E. *et al.*, 2008).

El PHABSIM predice los cambios del microhábitat físico asociados con las alteraciones del flujo tal como una reducción en su caudal para los cambios estacionales, provee además herramientas de simulación, las cuales caracterizan la estructura del microhábitat físico de un río y describen las características dependientes del flujo del hábitat físico en función de las respuestas biológicas de una especie objetivo seleccionada y sus estadios de vida (USGS, 2001).

La relación entre el hábitat físico y la producción de peces o cualquier otro organismo acuático asume que la generación de beneficios para los peces está limitada por la disponibilidad de hábitat físico. Esta suposición no siempre es verdadera. La producción puede estar limitada por la calidad del agua (*i.e.*, lluvia ácida), por las actividades del hombre (*i.e.*, actividades de uso de tierras ó la sobreexplotación de algunas especies), o por los acontecimientos y las condiciones que ocurren en una escala temporal y espacial más allá del alcance de la aplicación del modelo (USGS, 2001).

En esencia en todas las situaciones, el hábitat físico es una condición necesaria, pero no suficiente, para la producción y supervivencia de organismos acuáticos. Por lo tanto, los resultados de PHABSIM pueden visualizarse mejor como un indicador potencial de población en sistemas donde las condiciones de hábitat que se describen en PHABSIM son las preocupaciones principales (USGS, 2001).

Para entender PHABSIM se deben comprender como se usa el termino general hábitat.

“Macrohábitat se refiere a una porción longitudinal de un río en el cual las condiciones químicas o físicas influyen la conveniencia de todo segmento de río para un organismo acuático. Mesohábitat es un área discreta de un río definida por la geometría del canal con características físicas similares (*e.g.*, pendiente, ancho, profundidad y sustrato). Dichas unidades geomórficas (Hawkins, *et al.*, 1993; en USGS, 2001) son llamadas comúnmente pozas, rabiones, etc. Microhábitat se refiere al área más pequeña ubicada dentro de una escala de mesohábitat más grande, utilizada por un organismo acuático para funciones específicas (*e.g.*, desove). Microhábitat se describe típicamente por una combinación de variables hidráulicas y físicas tales como: profundidad, velocidad, sustrato y cobertura en una escala espacial cerca del cero hasta algunos metros. Finalmente, el hábitat total es una agregación de área mojada disponible condicionada por conveniencias de microhábitat y macrohábitat” (USGS, 2001).

“PHABSIM estima los cambios en el microhábitat físico como una función del flujo, pero no integra directamente otros elementos de sistemas lóticos tales como, calidad del agua y entradas de energía (USGS, 2001).

El resultado más común de PHABSIM es el área utilizable ponderada (WUA). Esta medida de hábitat es una combinación de cantidad y calidad del microhábitat físico. La WUA se expresa en unidades de área de microhábitat por unidades de distancia a lo largo de un río (*e.g.*, pies cuadrados por 1000 pies de río ó metros cuadrados por 1000 m) en IFIM, los valores de microhábitat obtenidos mediante el PHABSIM sirven de base para la valoración de una propuesta alternativa en el manejo de un río, que conllevará a la negociación de los regímenes de caudales (USGS, 2001).

El PHABSIM está enfocado para usarse en aquellas situaciones donde el flujo del río es un factor limitante que controla los recursos acuáticos y las condiciones del campo son compatibles con las teorías base y suposiciones de varios modelos de hábitat se conjugan razonablemente. El PHABSIM puede conjugarse con el análisis de series de hábitat para incorporar el componente temporal en la variación del hábitat (USGS, 2001).

El análisis hidrológico es la base para conocer los límites de las aportaciones naturales de agua, haciendo gran énfasis en correlacionar el hábitat con la cantidad de agua y su evolución temporal; de tal forma que se pueda llegar a una negociación en la planificación de los usos del agua. Compartir el agua disponible durante los ciclos de sequía, contribuye a la compatibilidad entre usuarios consuntivos y los medioambientales, permitiendo una rápida recuperación de las poblaciones acuáticas durante las épocas más favorables (Stalnaker et al., 1994 en Cervantes Servín A. 2011).

2.- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

2.1 JUSTIFICACIÓN

La problemática de muchos ríos tiene relación con la modificación con su régimen de caudales naturales; tal es el caso del meandro del río Lerma en la Piedad, Michoacán, donde hace algunos años, en la época de lluvias, se presentaban inundaciones importantes, lo que llevó a la construcción de obras de infraestructura para controlar el agua que entra al meandro.

El efecto de estas obras fue que el meandro quedó prácticamente sin flujo de agua durante la época de estiaje, provocando la acumulación de aguas negras y por consiguiente los grandes cambios en el ecosistema acuático que hay en este tramo de río.

La simulación del hábitat físico fluvial es una herramienta importante para determinar el hábitat disponible en función de las variaciones del caudal que circula o circularía, por un tramo de río, y los resultados constituyen la base para proponer regímenes de caudales ecológicos o ambientales, así como evaluar el impacto en el hábitat disponible para las modificaciones relacionadas con proyectos que propicien la modificación del régimen de caudales del tramo de río correspondiente.

Cabe mencionar que la simulación del hábitat físico está contemplada en la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012), que establece el procedimiento y especificaciones técnicas para la determinación del caudal ecológico en cuerpos de agua nacionales en cuencas hidrológicas.

Por lo anterior, en el presente trabajo de tesis se tienen los objetivos que se mencionan enseguida.

2.2 OBJETIVOS

1 Estimar el hábitat físico para varios caudales, en el tramo del Río Lerma ubicado en la Piedad Michoacán.

2 Analizar la variación del hábitat físico en función de los caudales circulantes, en el tramo del Río Lerma ubicado en la Piedad Michoacán.

3 METODOLOGÍA

3.1 TRAMO DEL RÍO LERMA PARA EL ESTUDIO

Ubicación

El meandro del Río Lerma está ubicado en la Piedad Michoacán y sirve de límite entre los estados de Michoacán y Guanajuato; y se encuentra entre las coordenadas siguientes: Latitud 20°22'21.24" N, de longitud 102° 0'57.09"O en la zona situada aguas abajo, y latitud 20°21'13.44"N y longitud 102° 0'13.48"O en la zona situada aguas arriba. Se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 1680 m. La cuenca del Río Lerma en la zona de la Piedad Michoacán se encuentra en la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago y pertenece a la subcuenca número 7 de la cuenca Lerma-Chapala, perteneciente al medio Lerma, que inicia en la salida de la Presa Solís y termina en la estación hidrológica Yurécuaro, abarcando un área de 26, 375 km², ubicándose parcial y totalmente en los municipios: La Piedad de Cabadas, Zináparo, El Triunfo y Ticuítaco.

El meandro del río Lerma ubicado en La Piedad, Michoacán, cuenta con una cortina que represa el agua a la altura del Parque Lázaro Cárdenas ("La Placa"), donde inmediatamente aguas arriba de esta, hasta la intersección con el dren de alivio, donde inicia el meandro, será el tramo de estudio del presente trabajo de tesis, (Ilustraciones 1.4 y 3.1) con una longitud de aproximadamente 4.95 km.

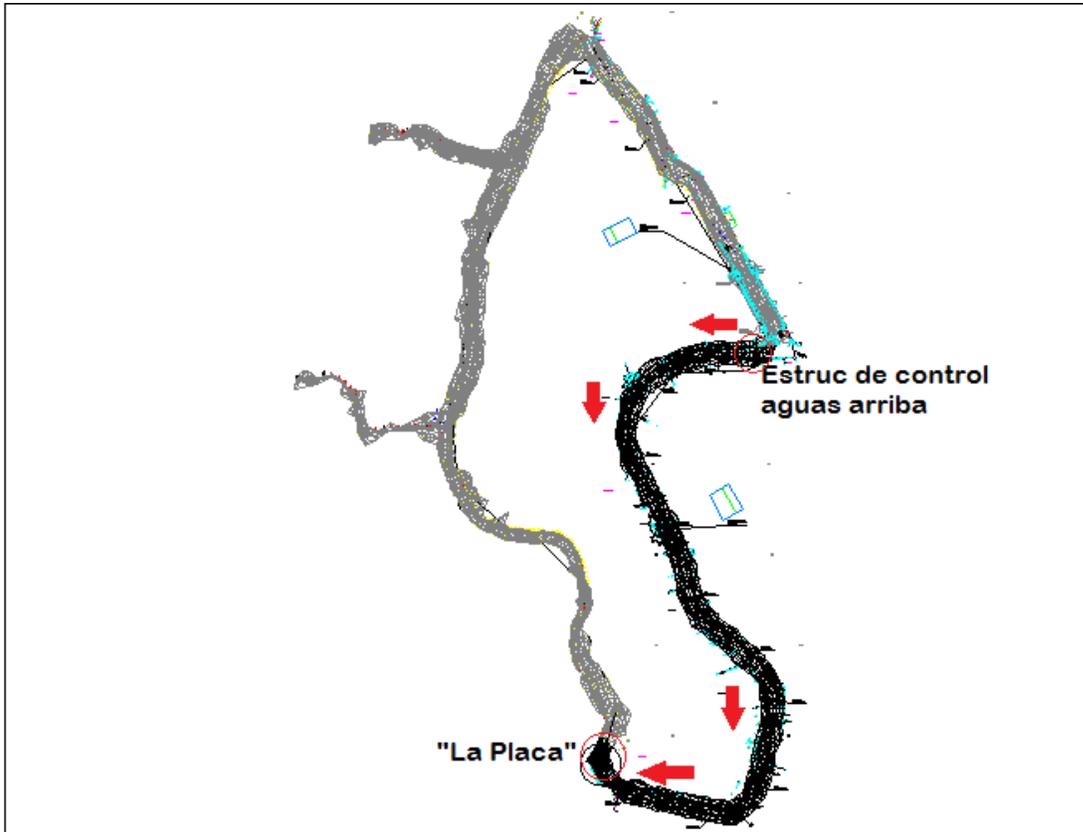


Ilustración 3.1. Tramo de estudio en el meandro del Río Lerma, La Piedad Michoacán.

El ancho promedio del tramo es de 50m, la pendiente media del tramo, a nivel de la vaguada, es de 0.0002.

Climatología

El clima en la Piedad de Cabadas es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con veranos calurosos y lluvias permanentes de junio a septiembre. Tiene una temperatura media anual de 17 °C. Su zona más alta se ubica en el volcán Nevado de Toluca, con 4690 metros sobre el nivel del mar (msnm), y la más baja en el Lago de Chapala, ubicada a 1600 msnm (INEGI, 2003)

Hidrología

El municipio de la Piedad se encuentra en la región hidrológica 12 dentro de la cuenca Lerma Santiago, donde se tiene la corriente perenne del Río Lerma.

En el Lerma Medio, el río fluye a través de lechos lacustres del Pleistoceno hasta caer de nuevo, entre La Piedad y Yurécuaro, al Lago de Chapala. Esta sección recibe tres tributarios importantes desde el norte: los ríos de la Laja, de Guanajuato y Turbio. Un arroyo menor, el río Tigre, está inundado parcialmente por el brazo septentrional de la presa Solís. Existen arroyos intermitentes como son Andaracua, Los Ocotes, La Soledad, Cinaparo, Las Vueltas, Prieto, Las Cañadas, Las Adjuntas, Chico, El Capulín, Caracuata, El Salitre y Domingo. Así como presas perennes como son Presa Ticuítaco y La Manga.

La precipitación media anual es de 764.4 milímetros, variando entre 1600 y 500mm anuales, de máximo y mínimo, respectivamente.

Hábitat

En el tramo de estudio se cuenta con pozas que pueden ser utilizadas como refugio para ictiofauna, ya sea para descansar, atrapar presas y anidar, y, de manera predominante, cuenta con zonas de aguas lentas (pozas, ya mencionadas) con sustrato arcilloso, así como detrito. En este tramo se observan, también, ramas y raíces sumergidas, cornisas, troncos y rocas que pueden constituir refugio para los organismos que lo habitan. El sustrato predominante está formado por barro o suelo arcilloso, detrito (con o sin presencia de árboles y

arbustos), así como arena y material pétreo de diferentes tamaños, empacado en sustrato arcilloso. (García Rodríguez, E., 2011).

Ictiofauna

Entre las familias más sobresalientes de peces en la cuenca media de río Lerma se encuentran la familia *Cyprinidae*, con las siguientes especies: *Algansea tincella*, *Hibopsis calientis*, *Yuriria alta* de la familia *Catostomidae* se encuentra *Scartomizon austinus*, de la familia *Ictaluridae*, *Ictalurus dugesii*, de la familia Goodeidae, *Allophorus robustus*, *Allotoca dugesii*, *Chapalichthys encaustus*, *Goodea atripinnis*, *Xenotoca variata*, *Zoogoneticus quitzeoensis*, de la familia *Poecilidae*, *Poeciliopsis infans*, de la familia *Aterinopsidae*, *Menidia aculeata*, *Menidia arge* y *Menidia jordani* (Miller *et al.*, 2005).

Es importante mencionar que debido a que no se cuenta con curvas de preferencia de hábitat de las especies antes mencionadas, se tomará como especie objetivo, para éste trabajo de tesis, la especie *Ictalurus Punctatus* ya que esta cuenta con características similares a la *Ictalurus dugessi* con una talla aproximada y de preferencias de hábitat similares.(Ilustración 3.2), por lo que se han adoptado las curvas de esta especie en sus estadios de desove, alevín, juvenil y adulto (Ilustraciones 3.9a, 3.9b, y 3.9c).



Ilustración 3.2 *Ictalurus punctatus* (bagre de canal), especie objetivo seleccionada para la simulación del hábitat físico del tramo de estudio (meandro) del río Lerma en La Piedad, Michoacán. (García Rodríguez E., 2011)

3.2 Datos de campo

3.2.1 Caudales objetivo

El sistema de simulación del hábitat PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) requiere, para la calibración de los modelos de la hidrodinámica fluvial, un juego de velocidades, tres preferentemente y tres alturas de la superficie libre del agua (ASLA), mediciones en algunas secciones transversales seleccionadas del tramo de estudio, para tres caudales diferentes de ser posible, con el fin de modelar el hábitat físico de la mejor manera posible.

En el caso de estudio del presente trabajo se obtuvieron datos hidráulicos relativos a dos caudales en cuatro secciones transversales.

$$Q_1 = 13.44 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 23.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se utilizó la información de campo antes mencionada, así como la información complementaria generada a partir de los mismos datos, en el proyecto FOMIX-CONACYT No. 73881 CONACYT-Gobierno del Estado de Michoacán-U.M.S.N.H, de tal manera que las alturas de la superficie libre del agua (ASLA), medidas para los dos caudales, se utilizaron para construir la curva de calibración de cada sección transversal (García Rodríguez, E., 2011).

3.2.2 Ubicación de secciones transversales

Las secciones transversales se han medido a una distancia de 50 metros a cada lado del eje del cauce, esto fue principalmente en la usencia de construcciones en las riberas del cauce y tomando en cuenta lo siguiente:

- Para garantizar un número suficiente de observaciones y tener una buena descripción hidráulica y del hábitat fue necesario ubicar secciones transversales en los controles hidráulicos del tramo de estudio, así como en los puntos situados entre dichos controles, de tal manera que permitieran definir adecuadamente el perfil longitudinal general del cauce (*i.e.*, remansos y rápidos), las variaciones del cauce en planta (zonas estrechas y anchas), zonas de flujo dividido (*i.e.*, zonas en las que se podrían formar islas), así como los perfiles de flujo. Se tuvo en cuenta también, la existencia de entradas de tributarios y/o extracciones de agua a lo largo del tramo de estudio, las cuales resultaron prácticamente nulas durante los muestreos.

- Se ubicaron secciones transversales adicionales, con el fin de poder efectuar una correcta simulación del hábitat, estas permitieron caracterizar los diferentes mesohábitats existentes en el tramo de estudio (i.e. rabiones, pozas y rápidos), así como captar, en términos generales, las zonas de cambio en el tipo de sustrato y zonas en las que existieran elementos de refugio (e.g., comisas, vegetación sumergida y emergente, zonas de rocas, y zonas de agua estancada) (García- Rodríguez, E., 2011).
- También se ubicaron secciones transversales antes y después de obras antropogénicas importantes como en la antigua presa ubicada en el parque “Lázaro Cárdenas del Rio” también conocido como “La Placa” (García- Rodríguez, E., 2011).

3.2.3 Ubicación de marcas de referencia en las secciones transversales

En la recopilación de datos para las simulaciones se recomienda que las marcas de referencia se encuentren a una distancia razonable del agua para evitar la perturbación durante los eventos de alto flujo (USGS, 2001).

En este caso, una vez que se definieron las secciones transversales, se colocaron elementos de marqueo (*i.e.*, trozos de varilla de acero) que constituyen una referencia horizontal y vertical estable, durante el tiempo de mediciones topográficas e hidrométricas. Estos se colocaron en los extremos de las secciones transversales. (García Rodríguez E., 2011)

3.2.4 Ubicación del nivel de referencia

Como niveles de referencia para determinar las alturas del agua, se utilizaron los bancos de nivel o mojoneras con coordenadas conocidas, durante los trabajos generales de topografía (García Rodríguez E., 2011).

3.2.5 Topografía

Para la obtención de la topografía, se elaboraron puntos de referencia utilizando una poligonal abierta a lo largo del tramo de estudio, de tal manera que con estos se obtuviera toda la información puntual y de detalles en las secciones transversales y así poder ligarlas a estos puntos, obteniendo así las coordenadas x, y, z de cada punto de las secciones respecto a las coordenadas del banco de nivel.

Los trabajos topográficos se efectuaron con una estación total y su correspondiente prisma. (García Rodríguez E., 2011)

3.2.5.1 Obtención de la topografía

Levantamiento de las secciones transversales

Se obtuvo la morfología del cauce en cada una de las secciones transversales ubicadas en el tramo de estudio, con los puntos necesarios para describir su forma, incluyendo los puntos de altura máxima que permitieron definir, con un mínimo de holgura, la zona por donde se esperaba que transitara el caudal más alto, para el cual se previó hacer mediciones y/o simulaciones de la hidrodinámica. Para estas mediciones también se tomaron, en las orillas del cauce, los pies del

talud, los puntos de profundidad máxima, así como las variaciones en el lecho del cauce en profundidades con respecto a la superficie libre del agua (ASLA) (Ilustración 3.3a) en todo el ancho de la sección (García Rodríguez E., 2011).

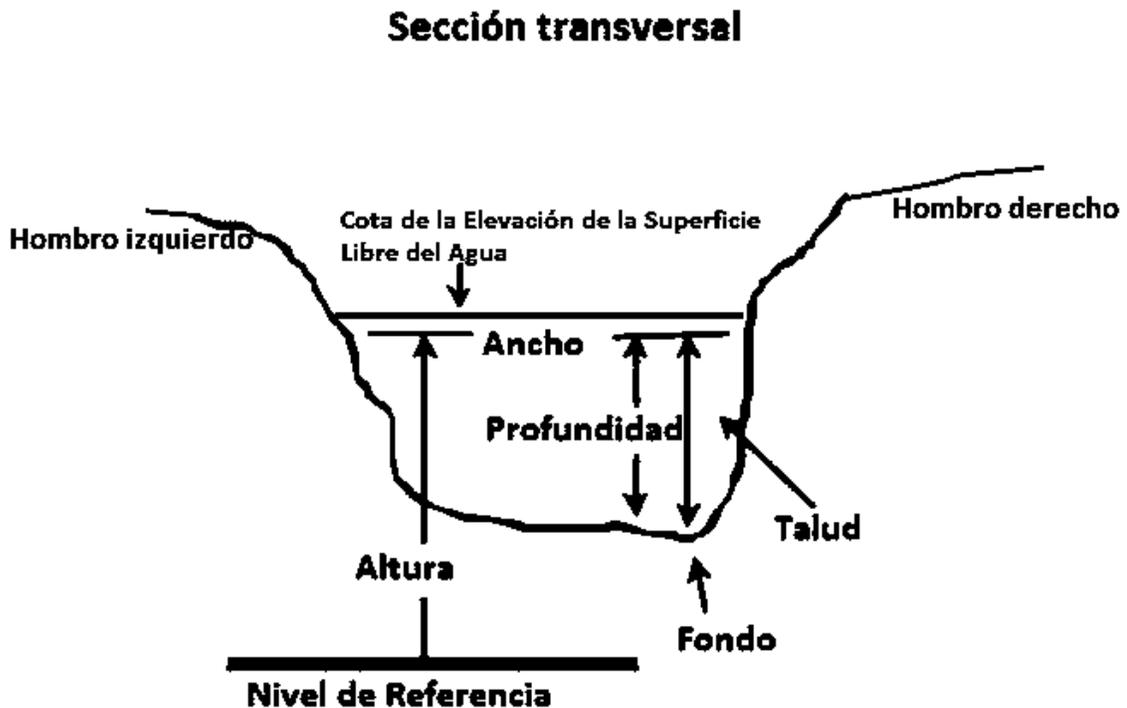


Ilustración 3.3a Lineamientos para el levantamiento de secciones transversales.

Para el levantamiento de las secciones transversales se enumerarán de aguas abajo hacia aguas arriba (así se dibujarán en los planos), iniciando el levantamiento de cada sección transversal en el lado derecho del cauce en relación a la dirección del flujo, en la que se estaban efectuando las mediciones, de acuerdo con la convención indicada en el modelo para la simulación de la hidrodinámica. (García Rodríguez E., 2011)

3.3 Obtención de datos hidráulicos

3.3.1 Medición de velocidades, tirantes y cálculo de caudales

La medición de velocidades, tirantes y el cálculo de caudales se efectuó en cuatro secciones transversales situadas de diferente manera: una sección en cada uno de los extremos del tamo de estudio (meandro), una sección situada inmediatamente aguas arriba y otra inmediatamente aguas abajo de la cortina de la represa del Parque Lázaro Cárdenas (“La Placa”) (García Rodríguez E., 2011).

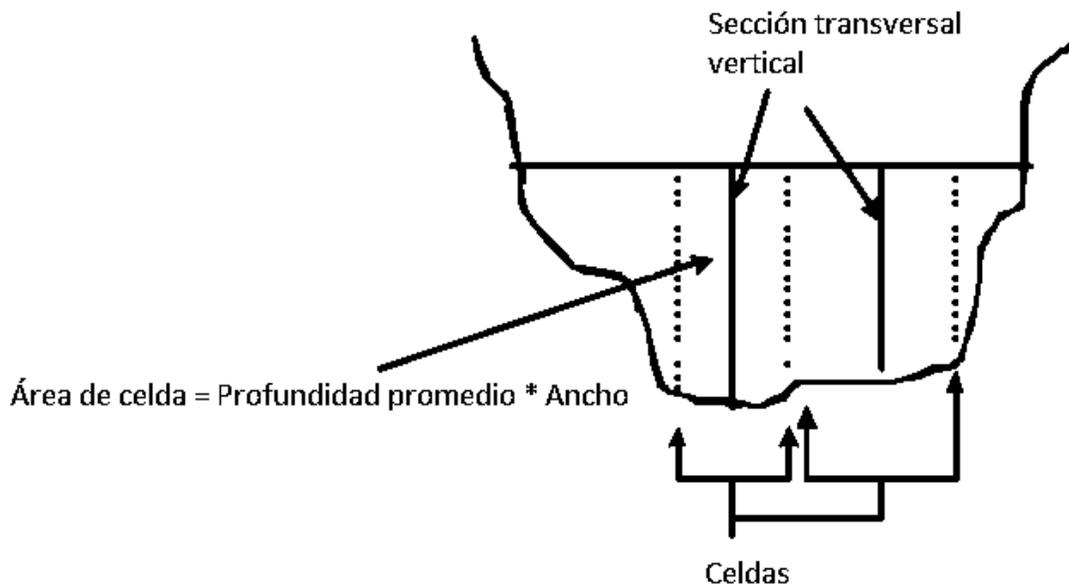


Ilustración 3.3b. Esquema de una sección transversal que muestra la medición hidráulica y términos de modelado. (USGS, 2001).

En los extremos de cada sección transversal se colocaron varillas de acero para marcar dichas secciones y poder sujetar los cables que permitieron desplazar el equipo de medición como se muestra en la ilustración 3.4.



Ilustración 3.4. Colocación de varillas de acero en los extremos de las cuatro secciones transversales utilizadas como base para obtener los datos hidrométricos para la calibración de los modelos de simulación de la hidrodinámica (García Rodríguez E., 2011).

Se obtuvieron velocidades y profundidades en cada sección transversal y datos para dos caudales diferentes (Ilustración 3.5).

La ilustración 3.5 muestra la representación de una sección transversal que define la relación entre los términos y definiciones que se encuentran en la misma ilustración.

La campaña de obtención de datos hidrométricos se realizó en un periodo de tres días, con el apoyo de la autoridad del agua y del Ayuntamiento de La Piedad, Michoacán. Los trabajos topográficos se efectuaron en un tiempo aproximado de un mes.

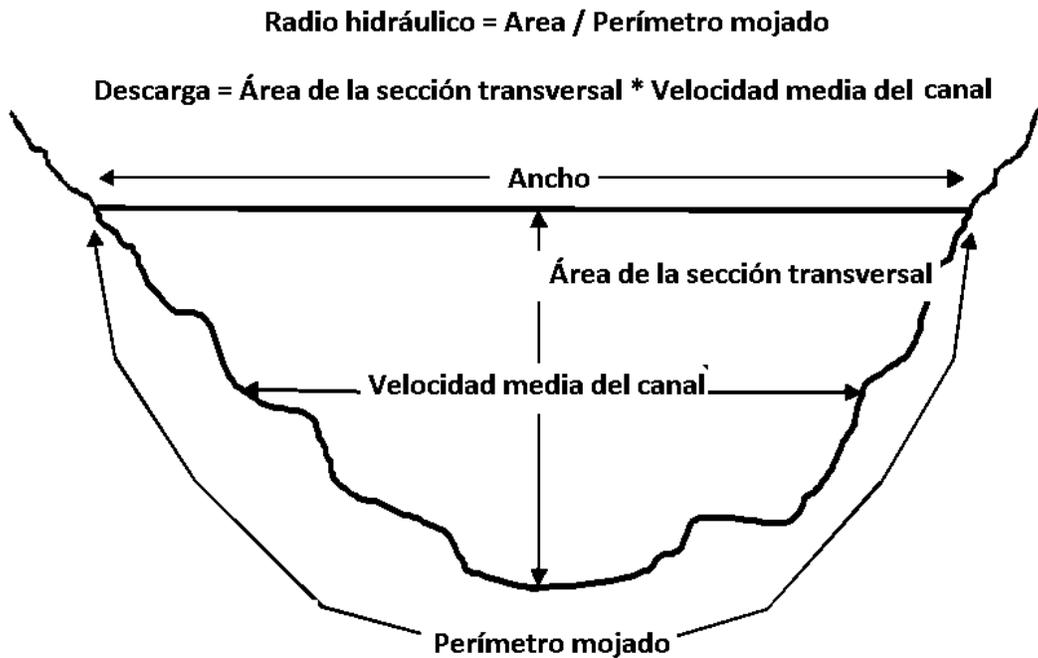


Ilustración 3.5 Sección transversal con terminología hidráulica. (USGS, 2001).

Para realizar los aforos en las cuatro secciones transversales se utilizó un perfilador acústico de efecto doppler (Ilustración 3. 6). Los cables con los que se desplazó el perfilador a lo largo de las secciones transversales se sujetaron en las varillas de acero que se colocaron en los extremos de las secciones para marcarlas (García Rodríguez E., 2011).

3.3.2 Altura de la superficie libre del agua (ASLA)

Esta se obtuvo a la par con la realización de los aforos, para cada caudal medido y cada una de las cuatro secciones transversales tomadas como referencia y con las mismas varillas de acero colocadas en las orillas de las secciones.



Ilustración 3.6. Aforo en el meandro del río Lerma, en La Piedad, Michoacán, efectuado utilizando un perfilador acústico de efecto doppler (García Rodríguez E., 2011).



Ilustración 3.7. Obtención de las alturas del agua durante los trabajos de hidrometría realizados en las cuatro secciones transversales de referencia, utilizando equipo topográfico (García Rodríguez E., 2011).

Los resultados obtenidos con los trabajos de hidrometría se muestran en el cuadro 3.1 y su representación gráfica en la ilustración 3.8.

Cuadro 3.1 Caudales de muestreo y sus correspondientes alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) en msns.

Caudal	ASLA Sección 1	ASLA Sección 2	ASLA Sección 3	ASLA Sección 4
m ³ /s	m	M	m	m
13.440	1670.746	1670.328	1669.510	1669.030
23.180	1671.147	1670.640	1670.075	1669.706

ASLA: Altura de la Superficie Libre del Agua

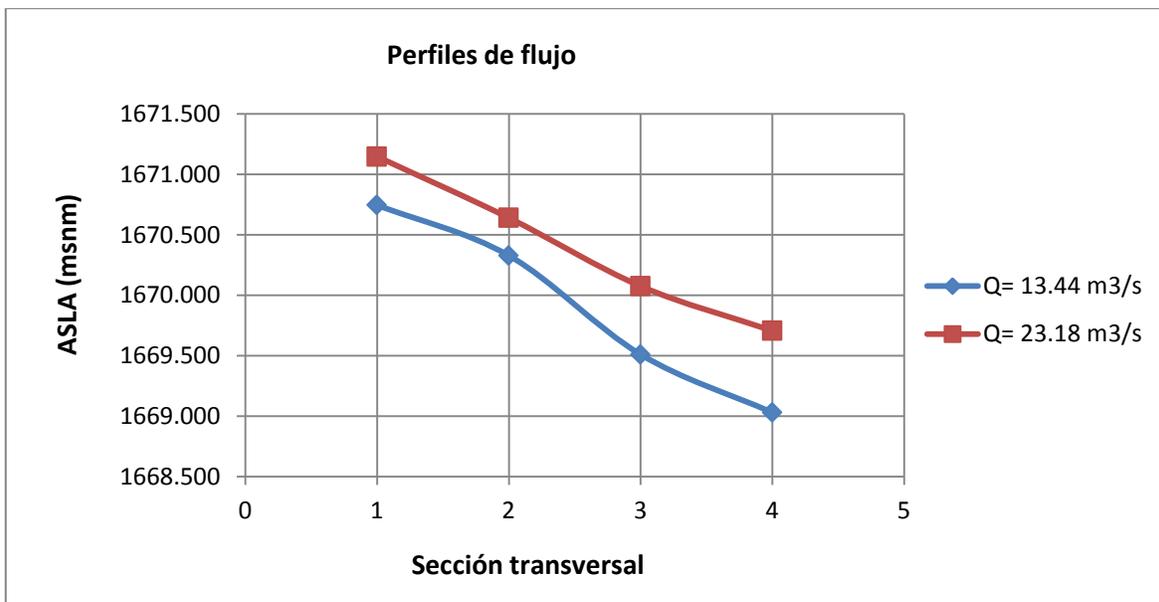


Ilustración 3.8. Perfiles de flujo obtenidos para los caudales aforados en cuatro secciones transversales, en el tramo de estudio del río Lerma (meandro) en La Piedad, Michoacán (García Rodríguez E., 2011).

3.3.3 Pendiente longitudinal

La pendiente longitudinal se obtuvo con los resultados obtenidos de la superficie libre del agua (ASLA) de cada sección transversal, utilizados también para la curva de calibración, con la finalidad de utilizarla en los cálculos hidráulicos.

3.3.4 Rugosidad (coeficiente “n” de Manning)

El valor del coeficiente de rugosidad “n” de Manning se determinó por medio de la observación de las características del cauce, utilizando valores contenidos en tablas de la literatura relacionada con el tema.

En el cuadro 3.2 se encuentran algunos valores típicos del coeficiente de rugosidad de Manning para cauces fluviales naturales (García Rodríguez E., 2011).

Cuadro 3.2. Valores típicos del coeficiente de rugosidad “n” de Manning para diferentes tipos y condiciones de cauce (Henderson, 1966 en García Rodríguez E., 2011)

Tipo de cauce	Rango del n de Manning
Limpio y recto	0,025 a 0,030
sinuoso, con pozas y zonas someras	0,033 a 0.040
Muy vegetado, sinuoso y ramificado	0,075 a 0,150
Cauces aluviales rectos y limpios	$0,031d^{1/6}$ (d = D-75{3er cuartil} talla en ft)

3.3.5 Registro de datos

Se anotaron en una hoja de registro los datos obtenidos con el fin de llevar a cabo un registro de la información de campo. Además de las mediciones realizadas, también se anotaron las características generales de cada zona de medición y, en particular, de cada sección transversal, que ayudaron a aclarar posibles comportamientos inesperados en la modelización (García Rodríguez E., 2011).

3.4 Obtención de datos complementarios de hábitat

Estos fueron obtenidos en campo a la par con los datos topográficos.

3.4.1 Sustrato

El tipo de sustrato del tramo de estudio fue obtenido en las secciones transversales. El sistema utilizado para la clasificación del sustrato, y los correspondientes códigos numéricos introducidos en el proceso de simulación de hábitat, cuadro 3.3, se basó en la clasificación empleada por Platts *et al.* (1983), quien sugirió que se utilizara la terminología y las clases de tamaño aceptadas por la American Geophysical Union (AGU), que contiene numerosas subdivisiones. El sistema que se ha utilizado en este trabajo, clasificado y simplificado (cuadro 3.3), tiene el objetivo de concordar con los tipos de sustrato utilizados en el desarrollo de las curvas de preferencia que se aplicaron en la simulación del hábitat. (García Rodríguez E., 2011)

Cuadro 3.3. Códigos de sustrato para determinar la preferencia de hábitat (García Rodríguez E., 2011).

Tipo de sustrato	Código	Rango de
		tamaños (mm)
Detrito (solo o asociado a árboles y matorrales)	1	
Barro	2	
Limo	3	0.062
Arena	4	0.062 - 2
Grava	5	*2 - 64
Guijarros	6	64 - 256
Roca	7	D > 256
Roca madre	8	Roca continua
D ₅₀ = Diámetro de las partículas que constituyen el 50% de la muestra		
Da= Diámetro del árbol		

3.5 Curvas de preferencia de hábitat

Las curvas de preferencia de hábitat de las especies ícticas objetivo integran los atributos de las celda de cálculo (*i.e.* velocidad, profundidad, e índice de cauce-sustrato en este caso) para estimar la cantidad y calidad del hábitat (cuadro 3.4). El índice de cauce se refiere al requerimiento de tipo de sustrato, refugio o una combinación de ambos. La unidad de medida que se utiliza es el hábitat potencialmente utilizable (HPU), en metros cuadrados por cada mil metros de longitud de río.

Se utilizaron las curvas de preferencia de hábitat de los diferentes estadios de desarrollo de la especie *Ictalurus punctatus*, así como los índices de preferencia de sustrato de los puntos topográficos levantados en campo. La clasificación de los tipos de sustrato y los códigos mediante los cuales se les introdujo en el modelo de simulación corresponde, se encuentran en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.4. Valores numéricos de las preferencias de Velocidad, Profundidad y Sustrato, de la especie *Ictalurus punctatus*, para el estadio de vida adulto, para utilizarlos en el modelo de simulación del hábitat físico. IP = índice de preferencia. (García Rodríguez E., 2011; basado en las curvas de preferencia desarrolladas por Herricks, E. E. *et al*, 1980).

n	Velocidad (m/s)	IP	Datos para la curva Preferencia de Velocidad	
(
1	0.000	1.00		
2	0.076	1.00		
3	0.091	0.98		
4	0.107	0.96		
5	0.229	0.84		
6	0.655	0.50		
7	0.701	0.44		
8	0.732	0.38		
9	0.768	0.32		
10	0.808	0.28		
11	1.021	0.20		
12	1.128	0.14		
13	1.250	0.06		
14	1.305	0.00		
15	30.000	0.00		
)				
n	Profundidad (m)	IP	Datos para la curva Preferencia de Profundidad	
(
1	0.00	0.00		
2	0.55	0.00		
3	0.58	0.04		
4	0.67	0.10		
5	0.85	0.16		
6	0.98	0.20		
7	1.04	0.24		
8	1.10	0.30		
9	1.22	0.70		
10	1.28	0.82		
11	1.40	0.96		
12	1.43	0.98		
13	1.46	1.00		
14	30.00	1.00		
)				

n	Código de Sustrato	IP	Datos para la curva Preferencia de Sustrato	
(
1	0.00	0.00		
2	1.74	0.00		
3	2.00	0.46		
4	2.20	0.62		
5	2.40	0.74		
6	2.70	0.86		
7	2.90	0.98		
8	3.00	1.00		
9	3.40	1.00		
10	3.90	0.96		
11	4.17	0.92		
12	4.40	0.88		
13	4.70	0.80		
14	5.10	0.64		
15	5.80	0.22		
16	5.87	0.18		
17	6.00	0.16		
18	6.80	0.10		
19	7.00	0.08		
20	7.30	0.04		
21	7.44	0.00		
22	8.00	0.00		
)				

Tipos de sustrato
Detrito (Solo o asociado a árboles y matorrales)
Barro
Limo
Arena
Grava
Guijarros
Rocas
Roca madre

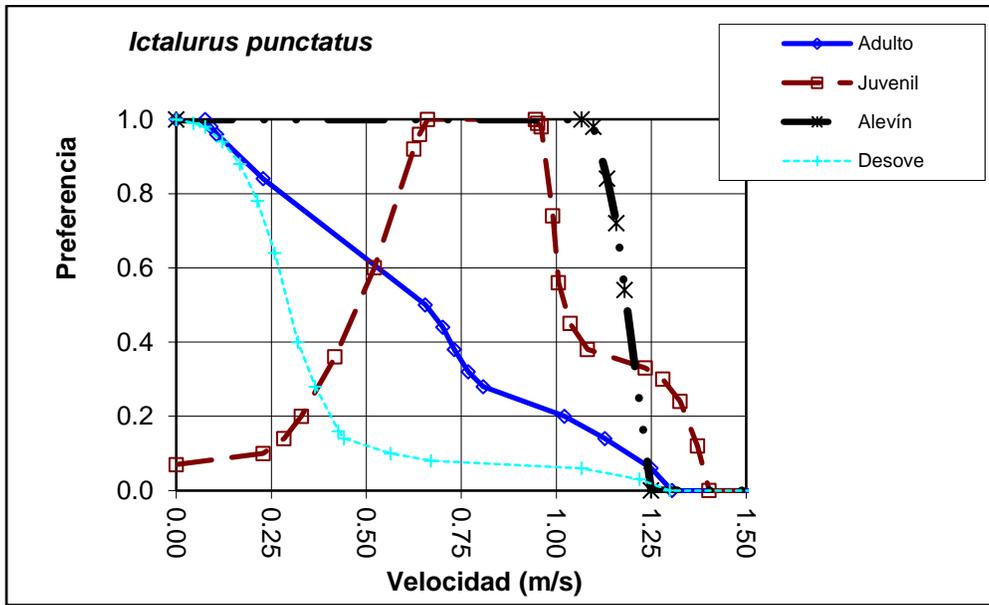


Ilustración 3.9a. Curva de preferencia de velocidad, especie *Ictalurus Puntatus*. (Herricks, E. E. *et al*, 1980 en García Rodríguez E., 2011).

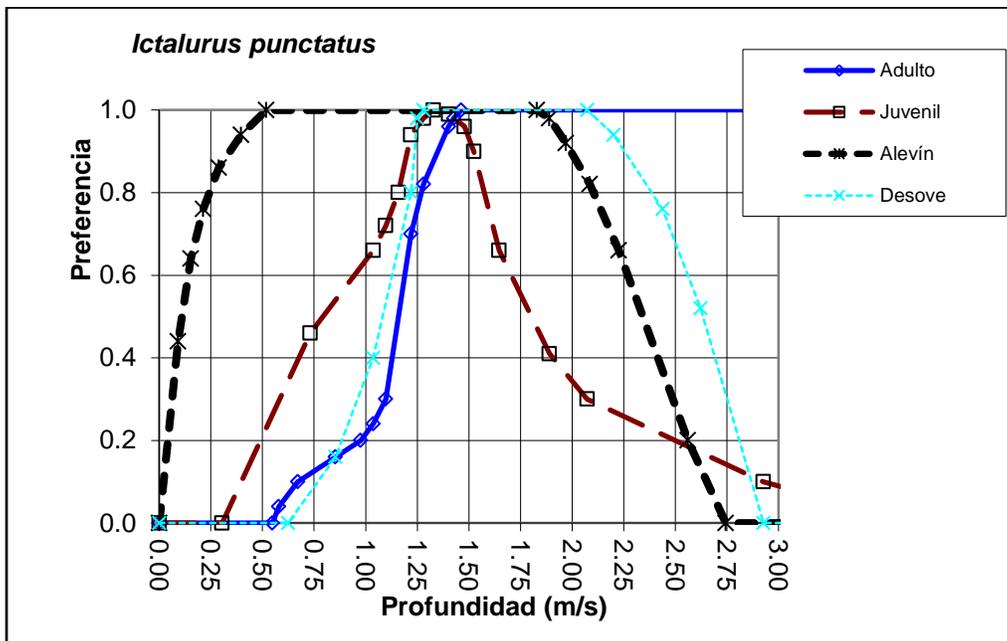


Ilustración 3.9b. Curva de preferencia de profundidad, especie *Ictalurus Puntatus*. (Herricks, E. E. *et al*, 1980 en García Rodríguez E., 2011).

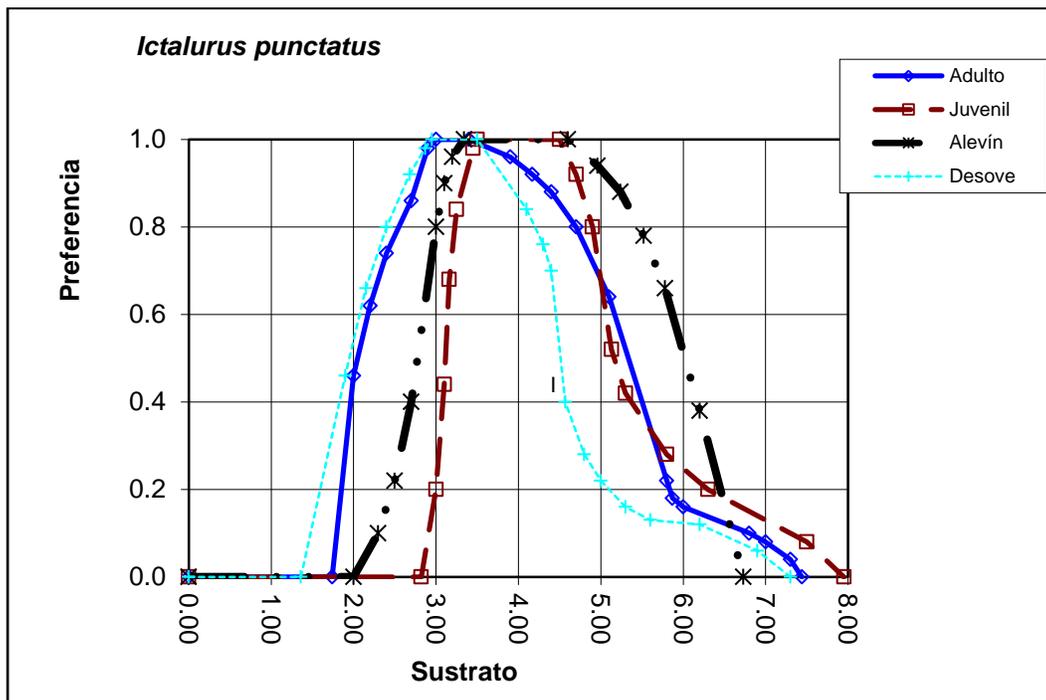


Ilustración 3.9c. Curva de preferencia de sustrato, especie *Ictalurus Puntatus*. (Herricks, E. E. *et al*, 1980 en García Rodríguez E., 2011).

3.6 Modelización

3.6.1 Sistema PHABSIM

Las técnicas utilizadas para la simulación hidráulica en un cauce, puede tener impacto significativo en la determinación del hábitat modelado en PHABSIM. La elección correcta de los modelos hidráulicos, así como la calibración adecuada representa un gran paso para un buen análisis. Los modelos para la simulación hidráulica en PHABSIM se aplican para determinar las características físicas del cauce tanto las elevaciones de la superficie del agua (*i.e.* la profundidad) y velocidades. En el proceso de simulación del hábitat esta información se integra

con los criterios, modelos o curvas de preferencia de hábitat (HSC- Habitat Suitability Criteria) para producir una medición de hábitat físico disponible como función de un caudal.

3.6.2 Modelización de la Altura de la Superficie Libre del Agua (ASLA)

El primer paso en la simulación hidráulica dentro del PHABSIM es la calibración y la simulación de la Altura de la Superficie Libre del Agua (ASLA).

3.6.2.1 Modelos

Dependiendo de la naturaleza de los datos de campo disponibles, se pueden emplear los siguientes programas y enfoques:

PROGRAMA STGQ

Este modelo se utiliza en la Relación altura-caudal (curva de gastos) para el cálculo de la superficie libre del agua en cada sección transversal. En simulación de esta relación (altura-caudal), cada sección es independiente de todas las demás en el conjunto de datos. El procedimiento de cálculo básico se lleva a cabo mediante la realización de una regresión log-log entre la cota observada y su par de caudal en cada sección transversal. La ecuación de regresión resultante se utiliza entonces para estimar Altura de la Superficie Libre del Agua (ASLA).

La relación entre el caudal y la ASLA (Altura de la Superficie Libre del Agua) se puede representar, para la sección transversal de un cauce, mediante la siguiente ecuación:

$$(ASLA - SZF) = aQ^b \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

Q = caudal

ASLA = Altura de la superficie libre del agua

SZF = cota o altura del agua para flujo (o caudal) nulo (o cero)

a = constante obtenida a partir de valores del caudal y ASLA medidos

b = constante obtenida a partir de valores de caudal y ASLA medidos

Notar que la SZF se incluye en la ecuación 1 ya que la relación Caudal-ASLA en la sección transversal del cauce es una función de la SFZ en ese sitio en específico. La SZF se utiliza en el programa STGQ y se debe incluir siempre que se utilicen las regresiones Caudal-ASLA. se puede transformar a una relación lineal entre la ASLA y el caudal, tomando logaritmos base 10 en ambos miembros, y queda como se muestra en la ecuación 2.

$$\log_{10}(ASLA - SZF) = \log_{10}(a) + b * \log_{10}(Q) \text{ (Ecuación 2)}$$

A partir de al menos tres pares de valores Caudal-ASLA medidos para una sección transversal, se puede efectuar una regresión lineal simple utilizando la ecuación 2 para obtener la constante y el exponente de la ecuación de regresión, y así poder utilizar ésta última para predecir la ASLA para una serie de caudales de interés. La efectividad de esta opción para la modelización de la superficie libre del agua no es función solamente de los datos obtenidos en campo, sino también

de la geometría del cauce y de la diferencia relativa de las pendientes de las líneas de regresión entre las secciones transversales adyacentes (USGS, 2001).

PROGRAMA MANSQ

El modelo MANSQ se puede utilizar para simular la relación Q-ASLA de las secciones individuales. El programa utiliza la ecuación de Manning para calcular los niveles de agua en una sección transversal y por lo tanto trata cada una como independiente. El modelo de calibración se lleva a cabo por un procedimiento de ensayo y error para seleccionar un coeficiente que minimice el error entre los niveles de agua observados y los simulados en todas las alturas medidas.

El modelo MANSQ utiliza la ecuación de Manning en la ecuación 3.

$$Q = \left(\frac{1.49}{n} * S^{\frac{1}{2}} \right) * A * R^{\frac{2}{3}} \text{ (Ecuación 3)}$$

La cual se simplifica como se muestra en la ecuación 4.

$$Q = KAR^{2/3} \text{ (Ecuación 4)}$$

El valor de K se determina a partir de un juego de datos de la Altura de la Superficie Libre del Agua (ASLA) medidos para un solo caudal y la geometría del cauce determinada en la sección transversal. Enseguida, el programa utiliza juegos de datos de calibración adicionales (Caudal-ASLA) para solucionar una de las ecuaciones 5 o 6.

$$K = K_0 * (Q / Q_0)^{\beta} \text{ (Ecuación 5)}$$

$$K = K_0 * (R / R_0)^{\beta} \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde el subíndice 0 se refiere a los valores de calibración.

β es un coeficiente que asigna el usuario, para cada sección transversal (USGS, 2001).

PROGRAMA WSP

Es un programa para modelizar el perfil de la superficie del agua en remansos, y se utiliza para predecir la manera en la que dicho perfil longitudinal cambia para un rango de caudales de simulación. El objetivo inicial en la calibración del modelo es el utilizar un procedimiento de prueba y error para seleccionar los coeficientes n de Manning en cada sección transversal, los cuales replicarán el perfil longitudinal de la superficie libre del agua para este caudal de calibración en particular.

El WSP requiere una altura de la ASLA (Altura de la Superficie Libre del Agua) o pendiente de energía como condición inicial. (USGS, 2001).

3.6.3 Velocidades

En PHABSIM, el programa VELSIM es la herramienta principal que se utiliza para simular las distribuciones de velocidad dentro de una sección transversal sobre el rango requerido de caudales (*i.e.*, la velocidad media de la columna en cada celda húmeda, en una sección transversal, estudiando la simulación de cada caudal). La técnica se basa en un conjunto empírico de las velocidades observadas (*i.e.*, velocidades medidas) que actúan como una plantilla de distribución de velocidades en un canal por resolver, para la “ n ” en la ecuación de Manning (*i.e.*

“n” actúa como un factor de distribución de la rugosidad en todo el cauce). El cauce se divide en celdas y la velocidad se calcula para cada una de estas. La práctica habitual es utilizar un conjunto de velocidades como una plantilla en la simulación de estas (velocidades) para una gama particular de caudales. (USGS, 2001).

El objetivo final de la calibración y la simulación de las velocidades, es escoger la mejor de estas y las opciones de simulación para representar los perfiles de velocidades en cada sección transversal en el intervalo de caudales simulados.

3.6.3.1 Cálculo de las velocidades de celda

La asignación del juego de velocidades número 1 a todas las secciones transversales y caudales indica al programa que se debe usar la distribución de velocidades del caudal de calibración menor como plantilla para simular todo el rango de caudales del estudio. Más tarde se cambiarán todos o algunos de los valores asignados, y se compararán los resultados de diferentes simulaciones de las velocidades para obtener un grupo final de juegos de calibración asignados para usar en cada combinación de sección transversal y caudal.

3.6.4 Modelización del hábitat ictiológico

La teoría general detrás de los programas de simulación de hábitat dentro de PHABSIM se basa en la suposición de que las especies acuáticas van a reaccionar a los cambios en el medio ambiente hidráulico. Estos cambios son simulados para cada celda en un definido tramo de río. La simulación del cauce toma la forma de una matriz multidimensional de las áreas de la superficie

calculadas teniendo diferentes combinaciones de parámetros hidráulicos (*i.e.*, la profundidad, la velocidad e índice de cauce) tal como se ilustra en la Ilustración 3.10 (USGS, 2001).

La profundidad y la velocidad de cada celda es el promedio de la profundidad simulada y de los valores de velocidad obtenidos de la fase de simulación hidráulica en PHABSIM. La profundidad y los atributos de velocidad varían con los cambios de los caudales, provocando cambios en la cantidad de hábitat disponible.

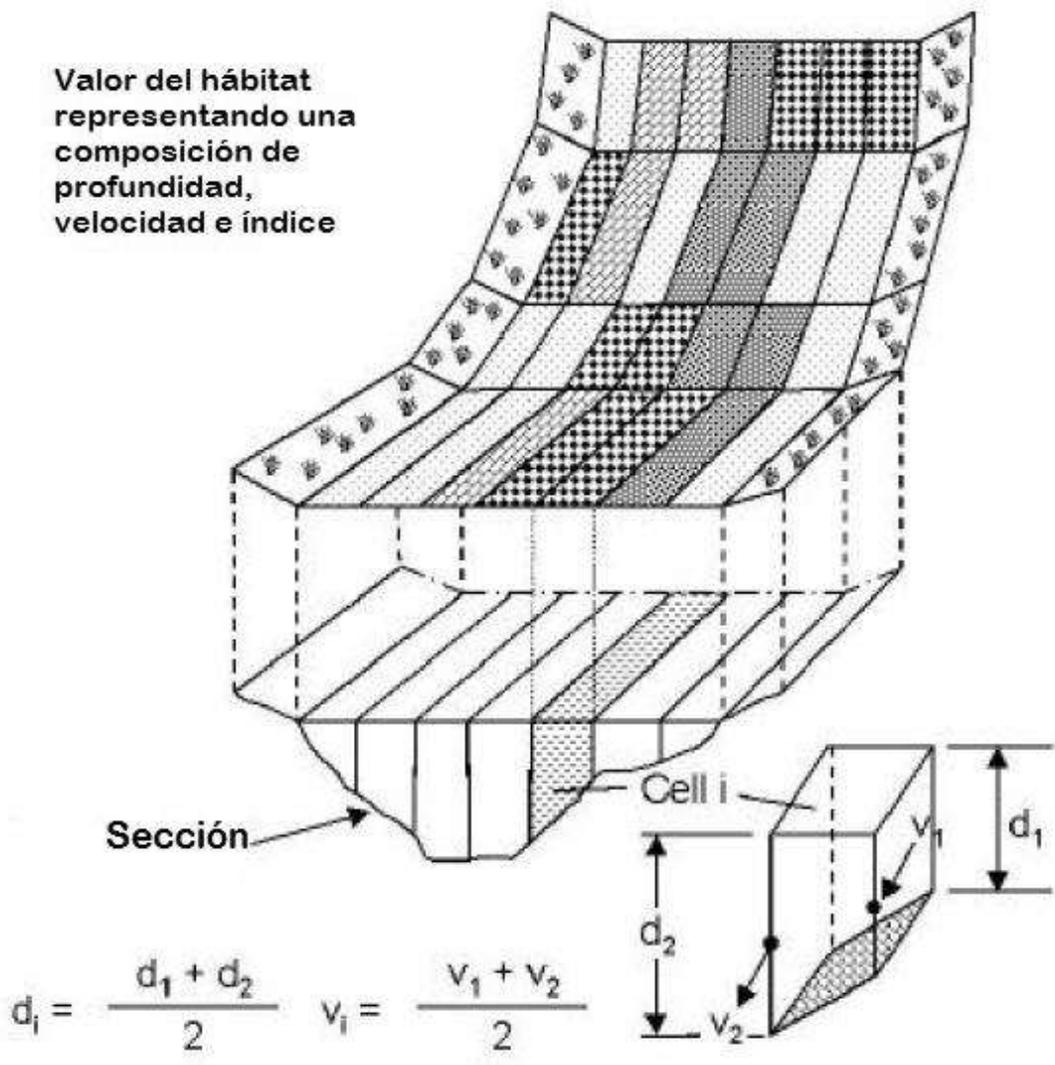


Ilustración 3.10. Atributos de las celdas en un sitio de estudio en el PHABSIM (USGS, 2001).

La modelización del hábitat transforma la información sobre la estructura del canal, la Altura de la Superficie Libre del Agua (ASLA) y las velocidades en un índice de la cantidad y calidad de hábitat disponible, usando la HSC (Habitat Suitability Curve) como la función de transferencia. Este índice de hábitat es denominado Superficie Útil Ponderada (WUA) y (ilustración 3.11) se calcula para cada celda a través de cada sección transversal en cada flujo de modelación. Los valores de celdas se suman para producir un sitio de estudio AUA y cumplir un determinado nivel, para cada especie por separado o etapa de vida. Esto permite construir la relación entre una gama de vertidos y disponibilidad de hábitat agregada para toda la zona de estudio Ilustración 3.11.

El producto final de la simulación de hábitat es una descripción del área como una función de las descargas. Esta información puede ayudar en la identificación de periodos de tiempo críticos para una etapa biológica, limitando la disponibilidad del hábitat para cada etapa (*i.e.*, capacidad física de transporte) y limitando la disponibilidad de hábitat para varias especies.

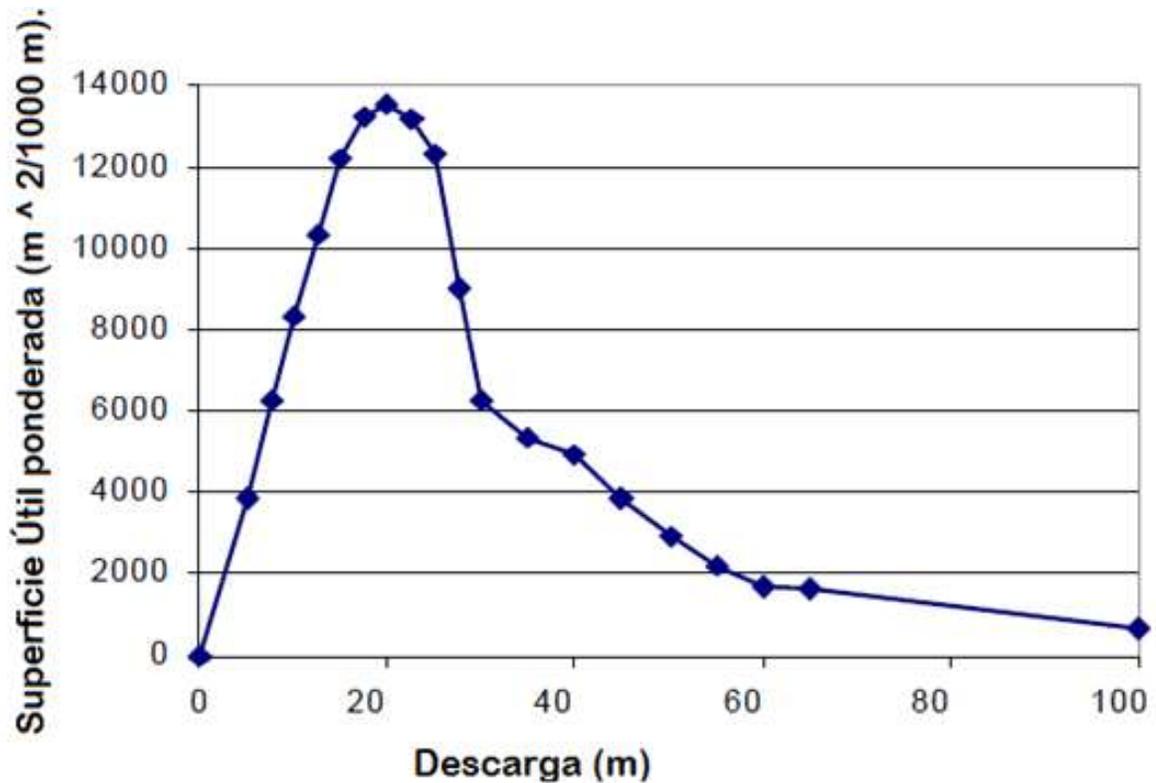


Ilustración 3.11. Relación hábitat-caudal para una especie/estadio derivada de un análisis PHABSIM (USGS, 2001).

El medio principal por el cual el PHABSIM integra la información biológica para la modelización del hábitat, es mediante el empleo de los criterios HSC (criterios de conveniencia de hábitat, a veces llamados criterios de conveniencia de uso).

3.6.4.1 Cálculo del Hábitat Potencialmente utilizable (HPU)

El cálculo se efectúa de acuerdo con la ecuación (7).

$$HPU = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * FCC_i}{Longitud.del.Tramo/(1000metros)} \quad \text{-----} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

A_i = área representada por la celda i a nivel de la superficie del agua.

FCC_i = factor de conveniencia compuesto de la celda i .

El método más común para el cálculo del factor de conveniencia compuesto (FCC) de una celda o elemento, es el de la integración multiplicativa, el cual se utiliza en el presente trabajo y se aplica a partir de la ecuación 8 (Bovee, 1998).

$$FCC_i = V_i D_i * S_i \text{_____} \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

V_i = Conveniencia asociada a la velocidad en la celda o elemento i .

D_i = Conveniencia asociada a la profundidad en la celda o elemento i

S_i = Conveniencia asociada al índice de cauce en la celda o elemento i

El cálculo de HPU se efectúa en cada celda o elemento finito en la que se simuló la velocidad y profundidad del agua.

4 RESULTADOS

4.1 Simulaciones de la altura de la superficie libre del agua (ASLA)

Los resultados de las simulaciones (ilustración 4.1) fueron obtenidos con ayuda del programa PHABSIM, empleando la aplicación STGQ para simular descargas de 5,10, 20, 25 y 30m³/s, estas fueron calibradas con los gastos de 13.4 y 23.2 m³/s.

Para las simulaciones de la ASLA's se observaron perfiles de flujo muy ajustados de los simulados a los medidos en la ilustración 4.2 se puede apreciar que son prácticamente iguales.

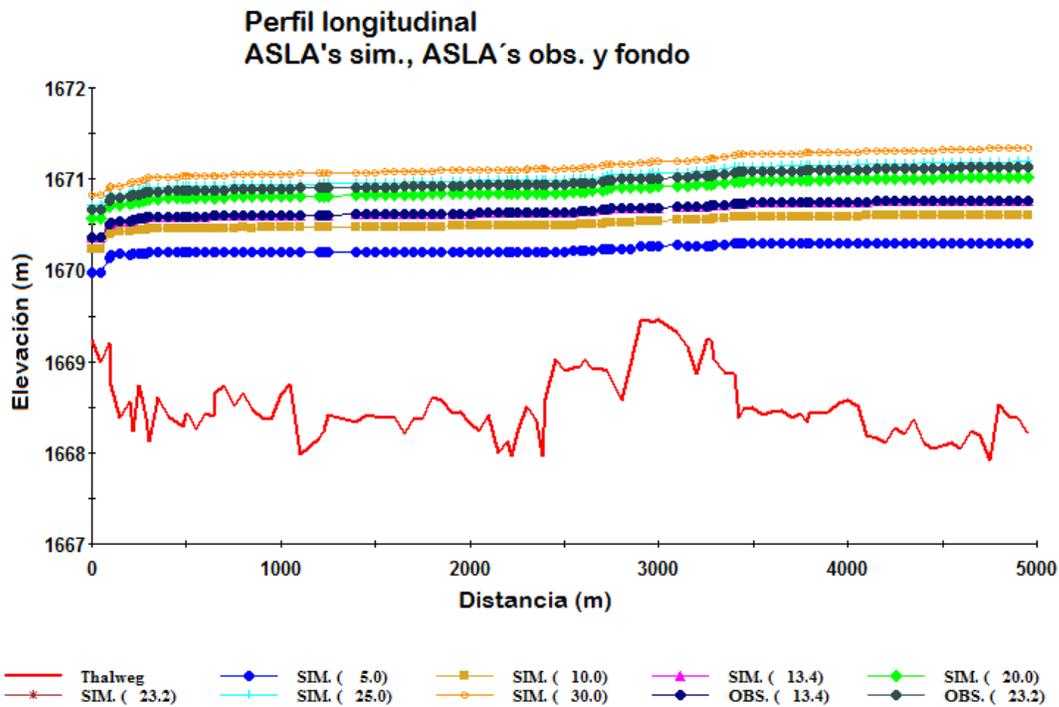


Ilustración 4.2. Perfil longitudinal de las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) para los caudales de 5,10, 13.4, 20, 23.2, 25 y 30.

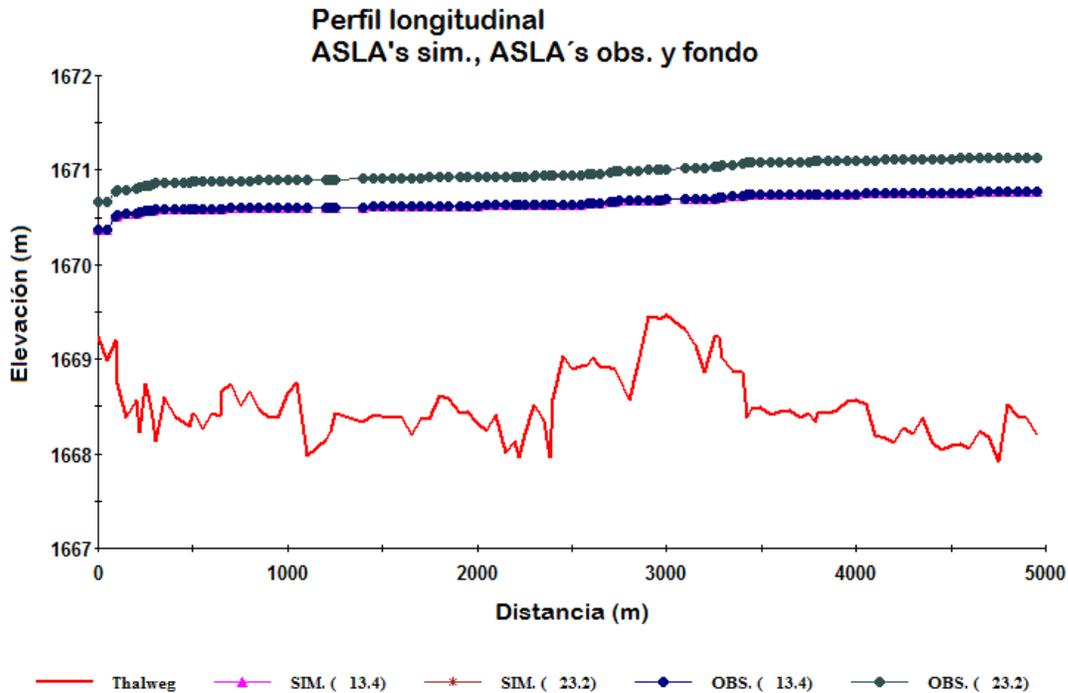


Ilustración 4.2. Perfil longitudinal de las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) simuladas y observadas para los caudales de 13.4 y 23.2 (m³/s).

4.2 Simulación de las velocidades

Se simularon los perfiles de velocidades utilizando dos juegos de velocidades medidas para la calibración del modelo (*i.e.* las obtenidas para los caudales de 13.4 y 23.18 m³/s). Se empleó el perfil de velocidades medidas de 13.4 (m³/s) para simular los perfiles propuestos más cercanos a este (*i.e.* 5 y 10 m³/s) y el perfil de 23.2 (m³/s) para simular los otros perfiles (*i.e.* 20, 25 y 30 m³/s) como se muestra en la ilustración 4.3 se observa un buen ajuste en los perfiles de velocidades medidas respecto a las observadas.

En las 113 secciones transversales ubicadas en el cauce se tienen diferencias aproximadas de un 3% del total de secciones; lo que indica que hay un buen ajuste de los perfiles.

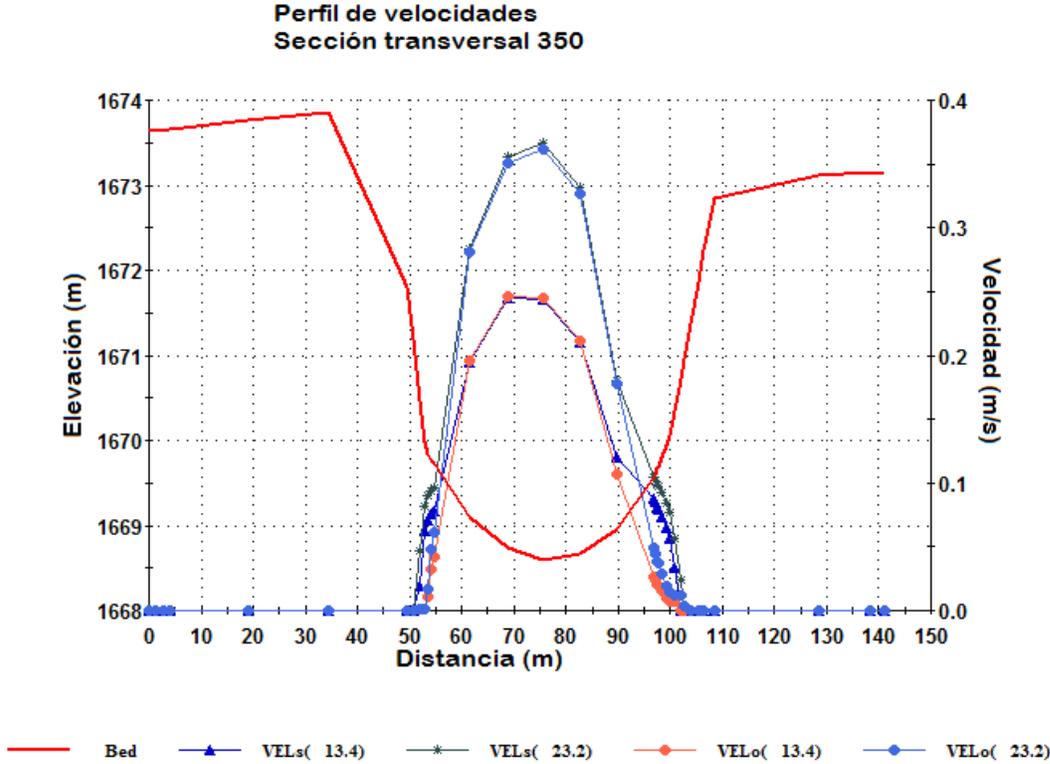


Ilustración 4.3. Perfiles de velocidades medidas y simuladas de los caudales de 13.4 y 23.2 (m³/s) en la sección transversal 350 del tramo de estudio.

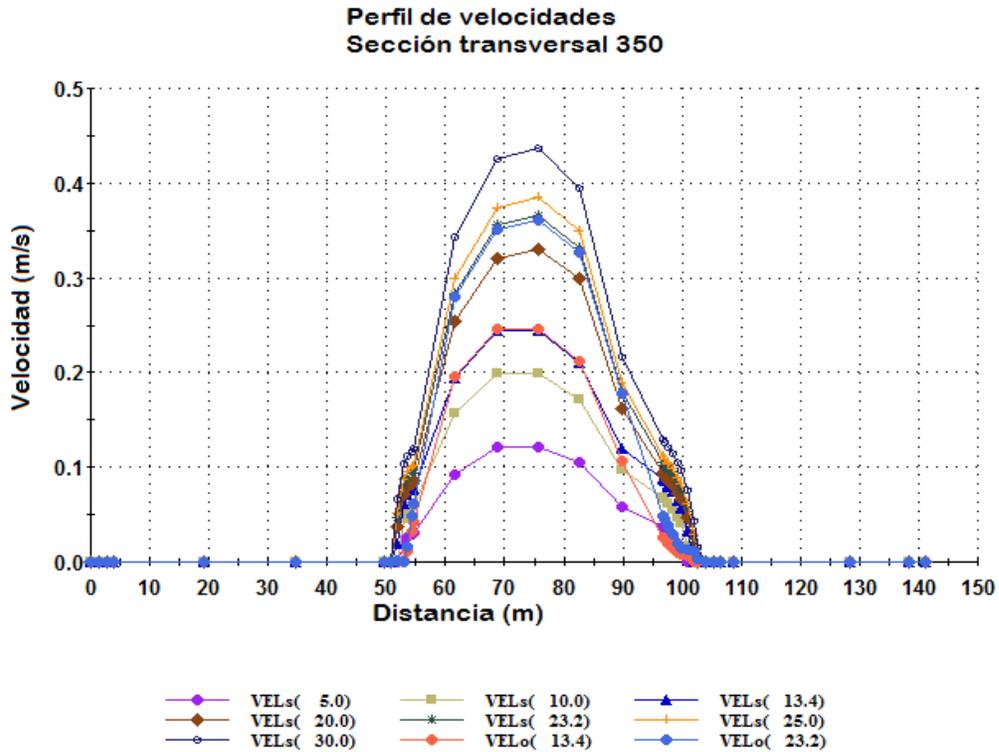


Ilustración 4.4. Perfiles de velocidades medidas y simuladas de todos los caudales en la sección transversal 350 del tramo de estudio.

4.3 Simulación del Hábitat Potencialmente utilizable (HPU)

A partir de las simulaciones del hábitat, tenemos como resultado el hábitat potencialmente utilizable (HPU) para diferentes estadios de desarrollo de la especie *Ictalurus Punctatus* en cada celda del tramo de estudio. En el cuadro 4.1 se encuentran los resultados obtenidos a partir de las simulaciones del hábitat. Con el contenido de estos datos se obtuvieron las curvas caudal-HPU (ilustración 4.5) para la especie objetivo.

Cuadro 4.1. Hábitat potencialmente utilizable para la especie *Ictalurus punctatus*, en sus estadios adulto, juvenil, alevín y desove en un tramo del meandro del río Lerma.

<i>Ictalurus Punctatus</i>		HPU (m ² /1000m)			
Q (m ³ /s)	Area Total m ²	Desove	Alevín	Juvenil	Adulto
5.000	44199.56	13372.68	613.41	32.06	10899.04
10.000	46505.27	14863.64	584.86	48.90	13011.55
13.440	47575.41	14436.63	546.07	59.99	13805.83
20.000	49145.33	11994.07	477.47	75.37	14287.68
23.180	49768.01	10773.43	458.57	80.19	14275.78
25.000	50102.08	10119.25	452.57	83.06	14238.38
30.000	50978.71	8575.03	432.03	88.59	14092.96

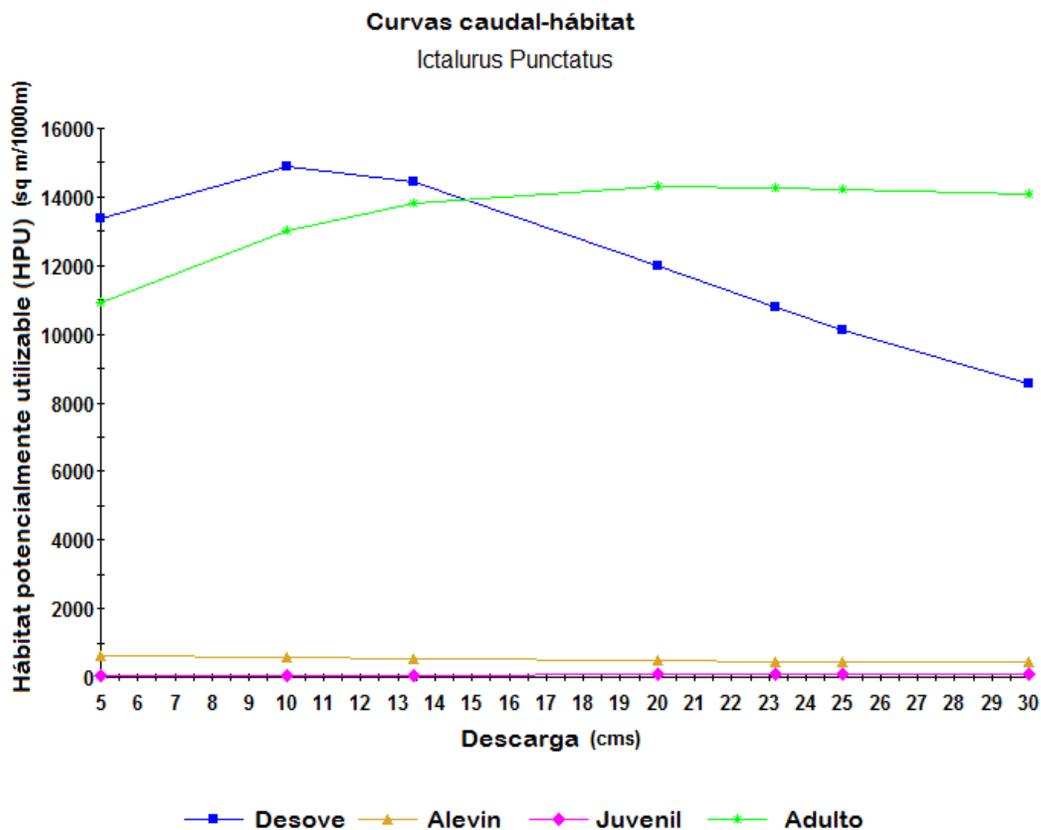


Ilustración 4.5. Curvas caudal-Hábitat Potencialmente Utilizable obtenidas para la especie *Ictalurus punctatus*.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para obtener una buena calidad en los resultados del hábitat, es necesario tener una buena calidad en la simulación de la hidrodinámica fluvial y calidad de los modelos de conveniencia de hábitat de la especie objetivo.

Simulación de la hidrodinámica fluvial

Esta se realizó usando el programa STGQ que forma parte del PHABSIM, basándose en la relación caudal-altura de la superficie libre del agua (ASLA) obtenidas de datos de campo del tramo en estudio.

Considerando que los modelos utilizados por PHABSIM no permiten simular adecuadamente los movimientos transversales del agua, es por ello que en este trabajo se consideró tomar la información de campo necesaria para una buena representación de la topografía del cauce y por ello el comportamiento del flujo.

Por esta razón se ha obtenido un buen ajuste en los perfiles de flujo simulados con respecto a los observados.

Simulación de las velocidades

El modelo que se empleó para la simulación de las velocidades (VELSIM del sistema PHABSIM) en cada una de las secciones transversales, el cual dio buenos resultados en términos generales a lo largo del cauce; sin embargo en algunos casos donde hay movimientos horizontales o trasversales el programa no los toma en cuenta por lo que esto puede provocar que no haya un buen ajuste en las velocidades observadas y simuladas. Se puede tener un mejor ajuste si hay mayor cantidad de datos de campo (*i.e.* mediciones para un mayor número de caudales que permitan captar las variaciones en los movimientos transversales), para ello son muy útiles los aparatos de precisos y fáciles de manejar.

Por otro lado sería conveniente realizar las simulaciones en programas bidimensionales, para obtener información de los movimientos transversales del flujo, y así obtener resultados más precisos con menor cantidad de información de campo.

Simulación del hábitat ictiológico

La simulación del hábitat físico se realizó con modelos del sistema PHABSIM usando cuidadosamente la información hidrodinámica y del hábitat de la especie objetivo. Los resultados obtenidos relacionan el hábitat potencialmente utilizable (HPU) para los diferentes estadios de vida de dicha especie, con los caudales que fluyen por el cauce del tramo de río en estudio (ilustraciones 4.5, 5.1 y 5.5, así como cuadro 4.1), de tal manera que en las curvas hábitat-caudales de las ilustraciones antes mencionadas se puede determinar el caudal que maximiza el HPU para cada estadio de vida de la especie objetivo (*i.e.* 10, 20, 5 y 30 m³/s, respectivamente para los estadios desove, adulto, alevín y juvenil), así como aquellos caudales que permiten conservar un % de HPU adecuado (*e.g.* 75%) respecto al que generaría el caudal que lo maximiza, de tal manera que se puede aportar esta información importante para la negociación de los caudales a conservar en el río y tenerlos en cuenta en la propuesta de regímenes de caudales destinados a la conservación ecológica.

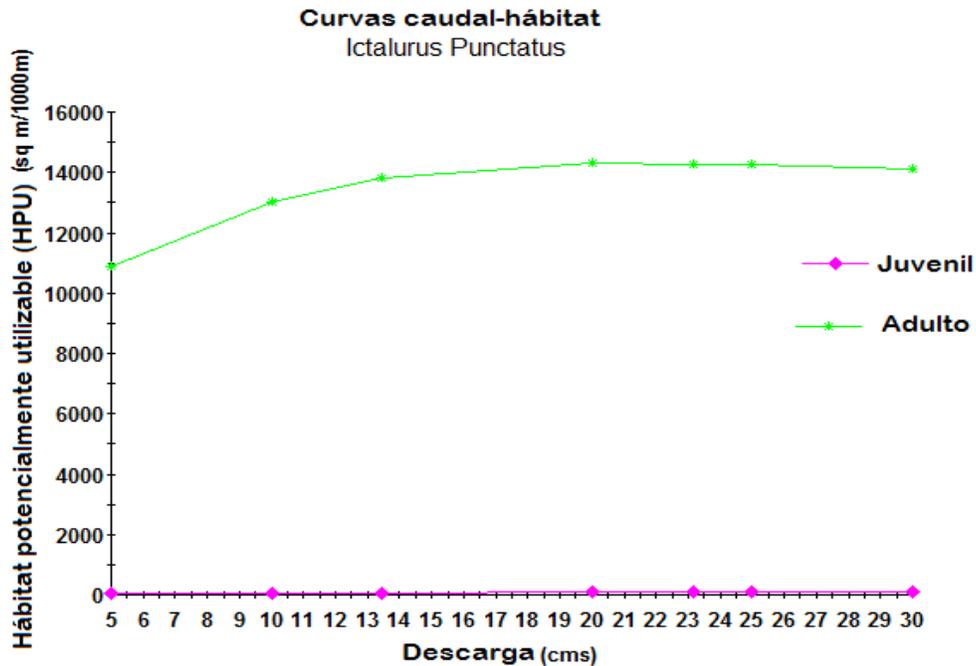


Ilustración 5.1. Curvas caudal-Habitat potencialmente utilizable obtenidas para la especie *Ictalurus punctatus* en los estadios juvenil y adulto.

La simulación efectuada mediante el PHABSIM permite obtener gráficas como las que se muestran en las ilustraciones 5.2.a 5.4, y 5.6 a 5.9, que muestran la calidad del hábitat mediante un código de colores que se muestra en cada ilustración; de tal manera que las zonas de color rojo aportan un Hábitat Potencialmente Utilizable de mayor calidad que las zonas con el resto de colores.

HABTAE Output For:
 Combined SI at 23.2 CMS
 Ictalurus Punctatus - Juvenil

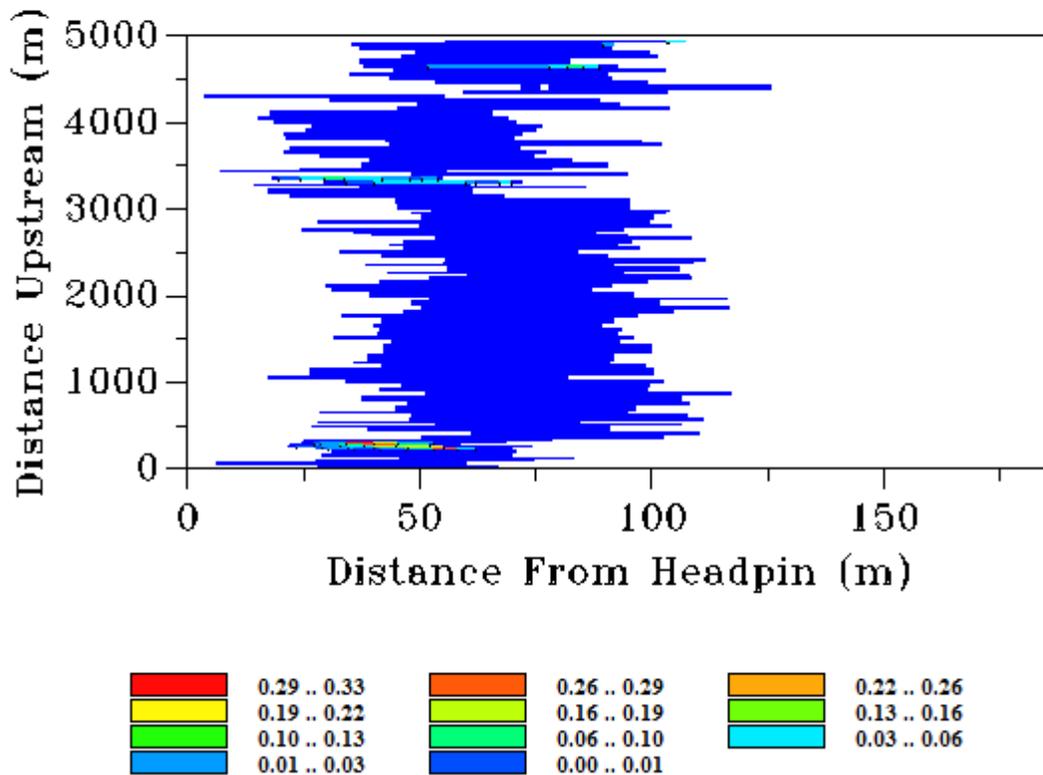


Ilustración 5.2. Área relativa al Hábitat Potencialmente Utilizable para la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida juvenil, para un caudal de 23.2 m³/s.

Podemos observar que el porcentaje del Área Potencialmente Utilizable es baja con respecto al área total, puesto que el color azul oscuro presenta calidad baja.

HABTAE Output For:
 Combined SI at 13.4 CMS
 Ictalurus Punctatus - Adulto

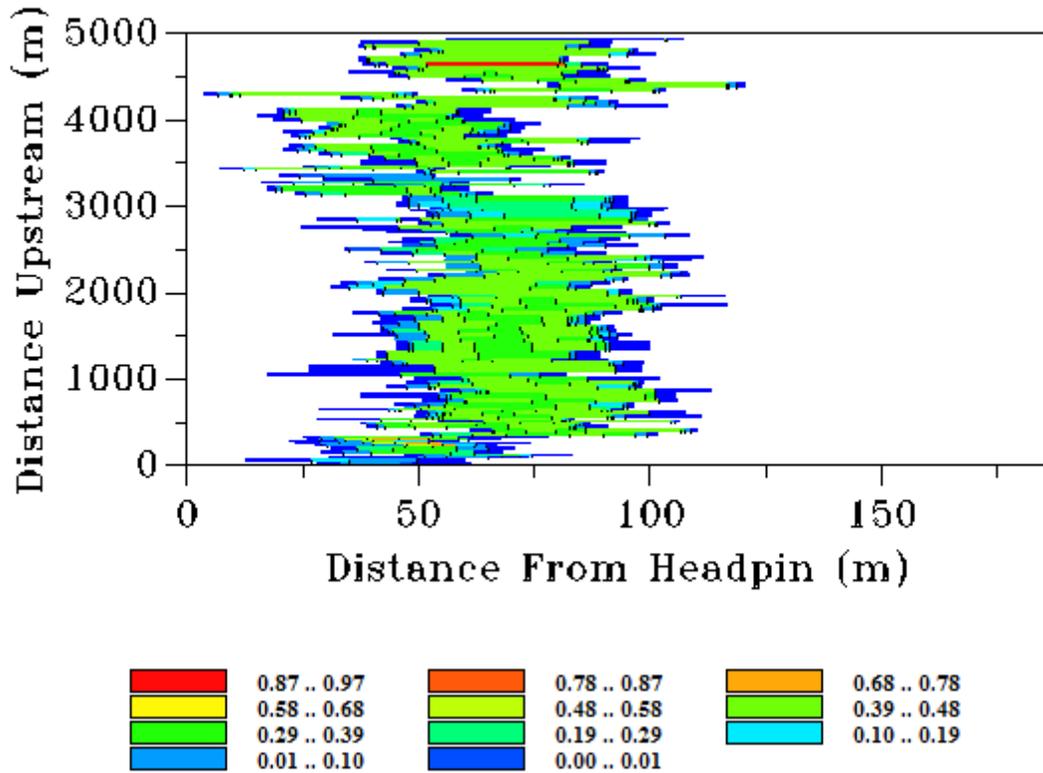


Ilustración 5.3. Área Potencialmente Utilizable por la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida adulto para un caudal de 13.4 m³/s.

HABTAE Output For:
 Combined SI at 23.2 CMS
 Ictalurus Punctatus - Adulto

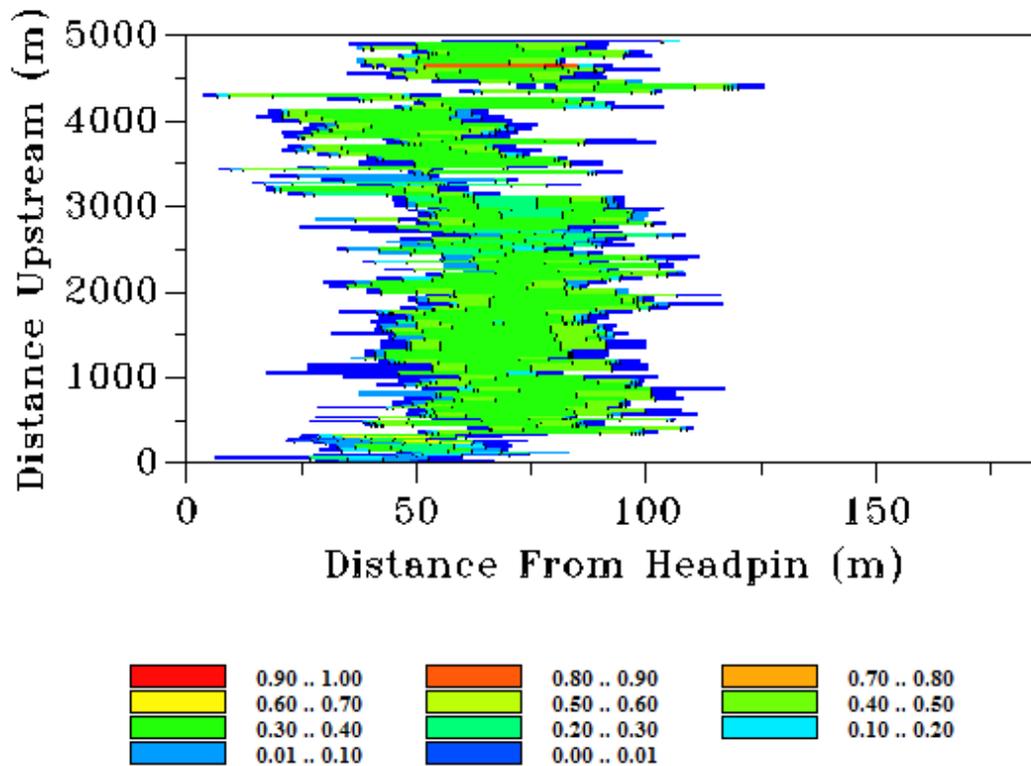


Ilustración 5.4. Área Potencialmente Utilizable por la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida adulto para un caudal de 23.2 (m³/s).

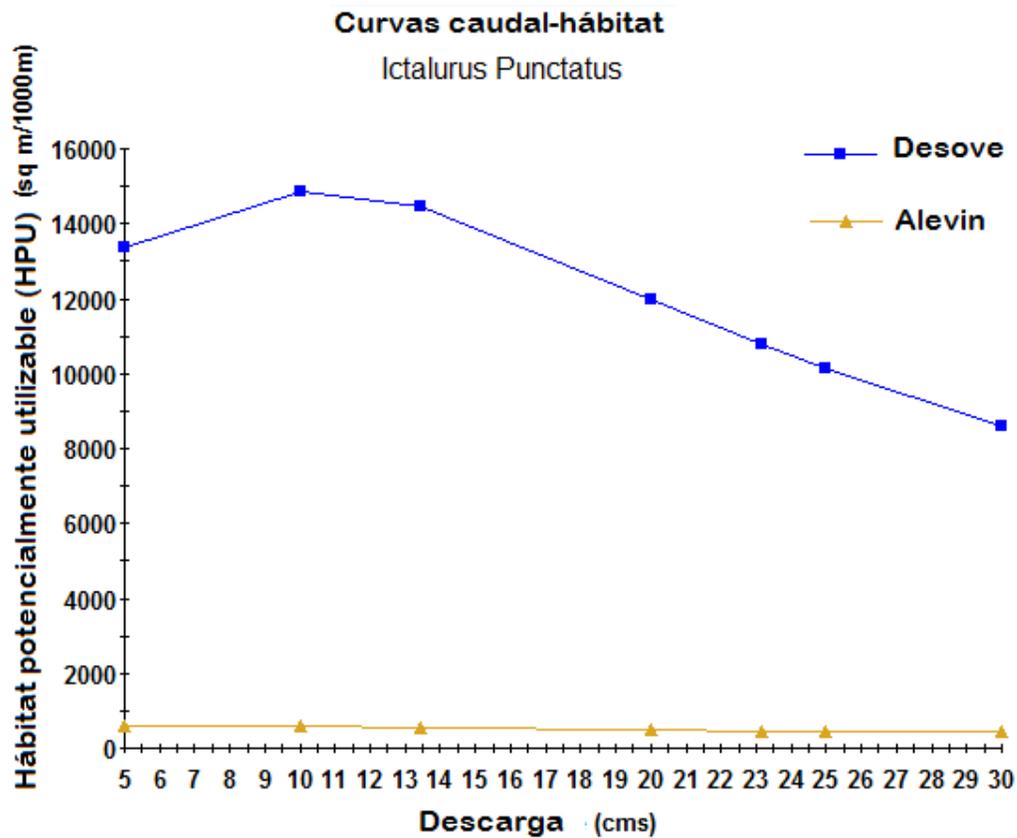


Ilustración 5.5. Curvas caudal-Habitat potencialmente utilizable obtenidas para la especie *Ictalurus punctatus* en sus estadios de vida dosove y alevín.

HABTAE Output For:
 Combined SI at 23.2 CMS
 Ictalurus Punctatus - Alevin

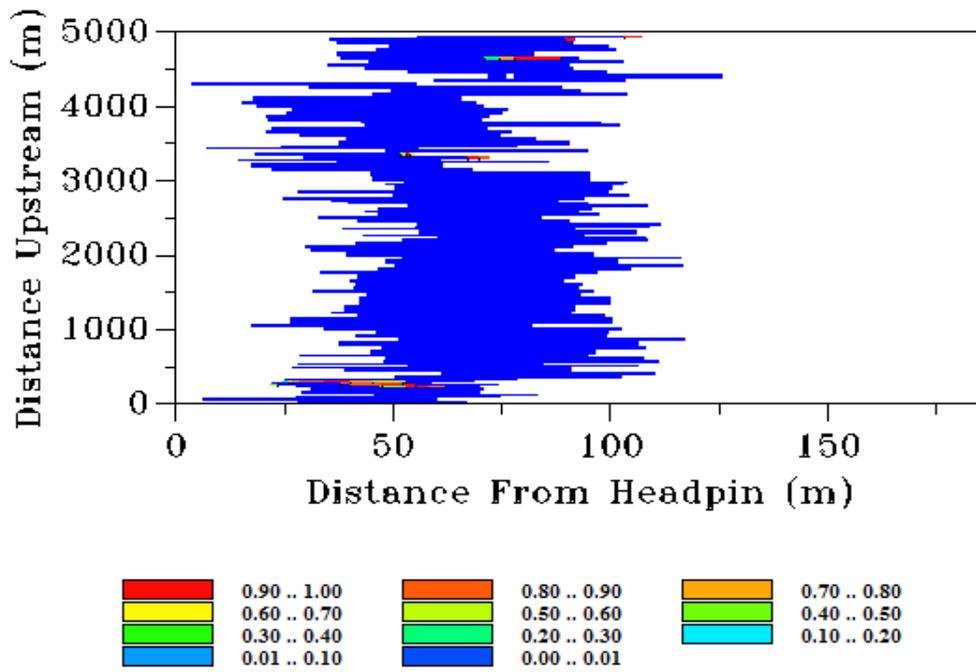


Ilustración 5.6. Área Potencialmente Utilizable por la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida alevín para un caudal de 23.2 m³/s.

HABTAE Output For:
 Combined SI at 5.0 CMS
 Ictalurus Punctatus - Desove

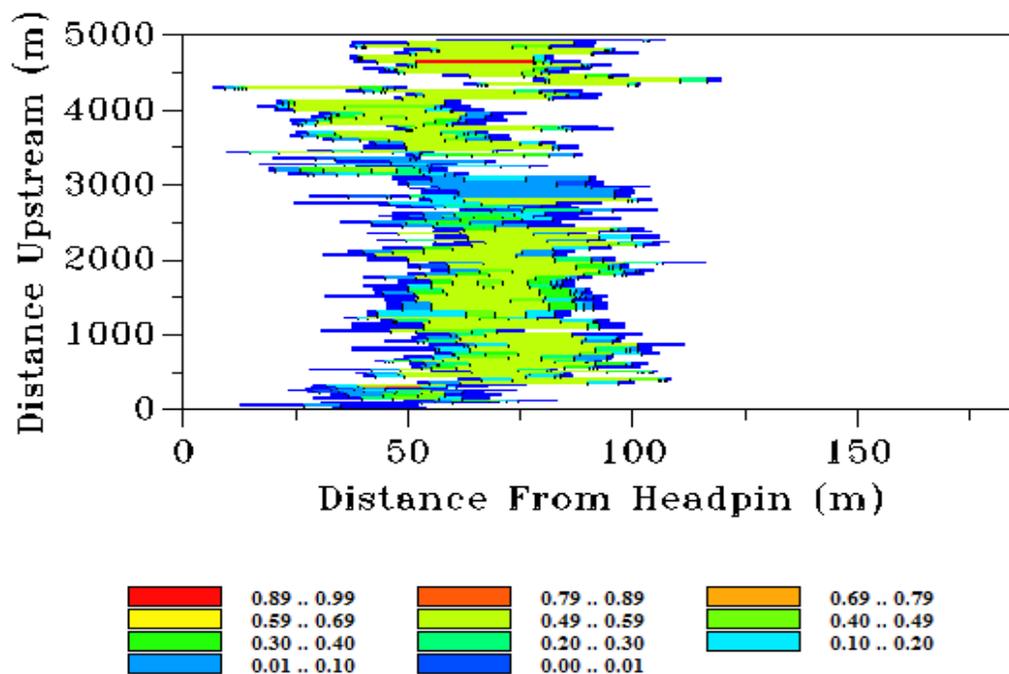


Ilustración 5.7. Área Potencialmente Utilizable por la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida desove para un caudal de 5 m³/s.

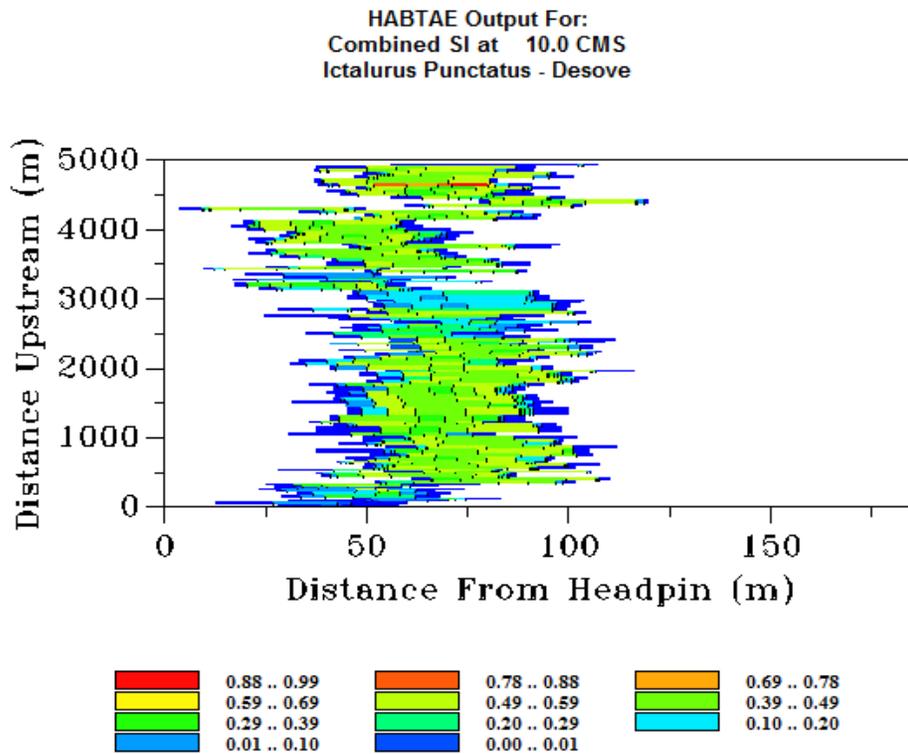


Ilustración 5.8. Área Potencialmente Utilizable por la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida desove para un caudal de 10 m³/s.

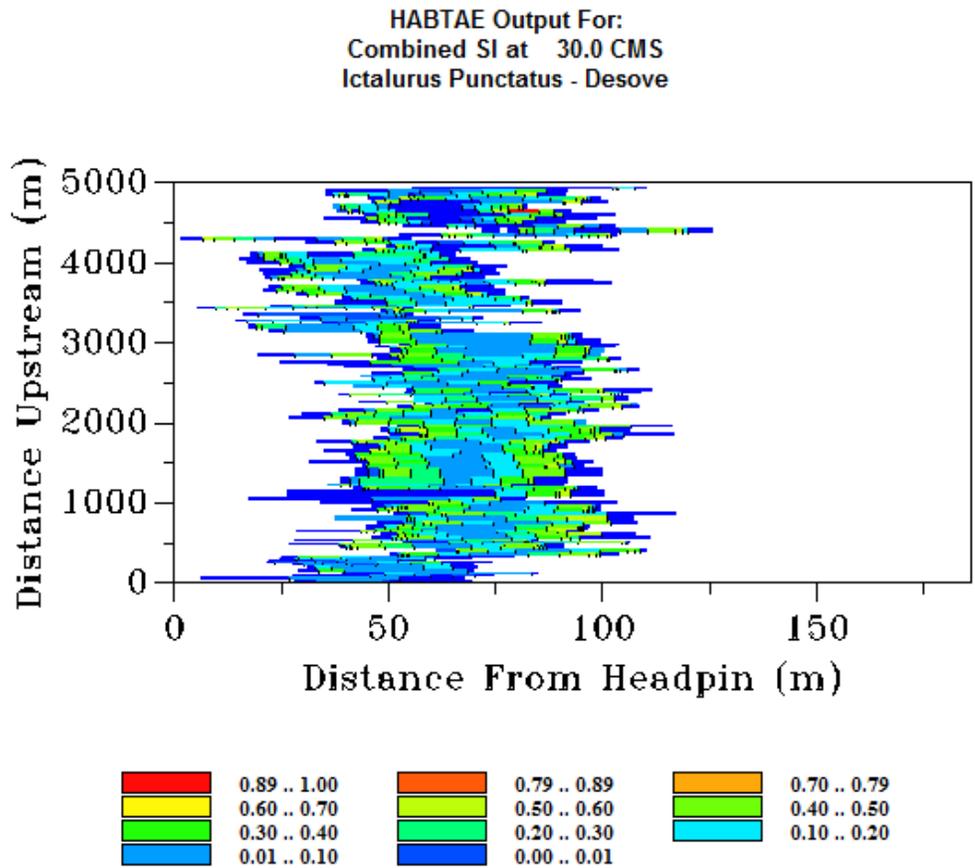


Ilustración 5.9. Área Potencialmente Utilizable por la especie *Ictalurus punctatus* en su estadio de vida desove para un caudal de 30 m³/s.

6 CONCLUSIONES

1 La simulación de las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's), utilizando el método caudal-ASLA de las secciones transversales favoreció considerablemente en los resultados que se obtuvieron ya que estos fueron adecuados para efectuar las simulaciones de velocidades en las secciones transversales en el tramo de estudio del meandro del río Lerma en la Piedad Michoacán.

Para efectuar esta simulación se consideraron dos pares de valores con los que se elaboró la curva de calibración. Fue muy importante esta calibración para los caudales simulados en la obtención de los perfiles de velocidades a partir de los observados. Estas se obtuvieron con el modelo VELSIM (del sistema PHABSIM) en cada sección transversal, dando buenos resultados, en términos generales, para el tramo de estudio. En algunas secciones hubo un poco de problemas con las velocidades simuladas que se pudieron deber a la precisión en las mediciones de campo, o a posiblemente flujos transversales no captados por el programa.

2 En las curvas caudal-Hábitat Potencialmente Utilizable (Q-HPU) (*e.g.* ilustración 5.10) se puede observar que los caudales que maximizan el HPU son 10, 20, 5 y 30 m³/s, para los estadios de vida desove, adulto, alevín y juvenil, respectivamente, de la especie *Ictalurus punctatus*.

Relación hábitat-flujo total
Ictalurus Punctatus

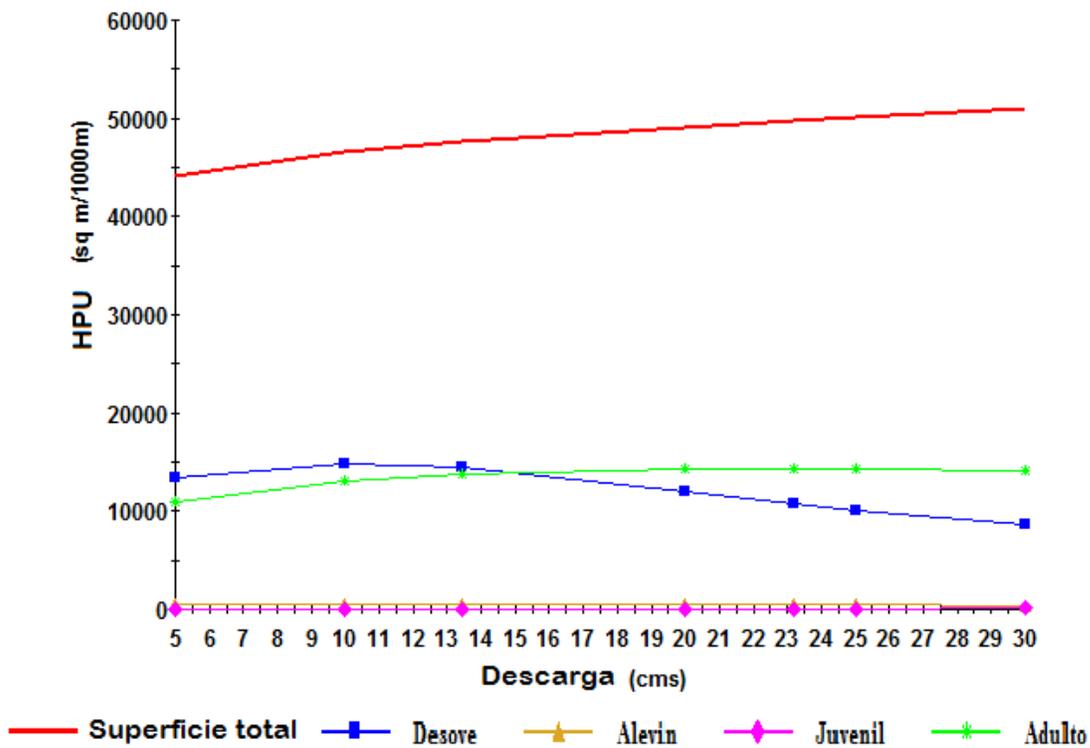


Ilustración 5.10. Curvas Caudal-Habitat Potencialmente Utilizable obtenidas para la especie *Ictalurus punctatus* en sus estadios de vida desove, alevin, juvenil y adulto, así como curva que representa el caudal-área total.

3 La información obtenida por las curvas HPU es una herramienta muy valiosa para el gestor del recurso hídrico y los diferentes usuarios en la determinación de un régimen de caudales ecológicos, los cuales definen el los gasto necesarios para la conservación ecológica del ecosistema fluvial y establecer la cantidad de agua disponible para otros usos.

4 Cabe mencionar que el Sistema de Simulación del Hábitat Físico (PHABSIM) es una buena herramienta utilizada para la estimación del hábitat potencialmente utilizable en un cauce y la determinación de regímenes de caudales ecológicos, y

así poder estimar los caudales circulantes para la preservación del ecosistema fluvial.

7 DOCUMENTOS CONSULTADOS

(Ayala Ortíz D., Abarca Guzmán F. (2012). *Valoración económica del saneamiento ambiental del río Lerma en la zona metropolitana de La Piedad y Santa Ana Pacueco, en el oeste de México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

(Castillo, ARQHYS. ARQUITECTURA. Agua y Civilizaciones, 2012). ARQHYS. ARQUITECTURA. *Agua y Civilizaciones*. <http://www.arqhys.com/construccion/agua-civilizaciones.html>. México. Consultado el 13 de Noviembre del 2012.

Bovee K.D., Lamb B.L., Bartholow J.M., Stalnaker C.B., Taylor J. and henriksen J. (1998). *Stream Habitat analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD- 1998-0004. Viii + 131 pp.

Bueno-Soria J., López Aguado B, Marqués Mayaudón C. (1980). *Consideraciones preliminares sobre la ecología de los insectos acuáticos del Río Lerma*. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Instituto de Biología, Departamento de Zoología, México 20, D.F.

Cervantes-Servín A. (2011) *Determinación de un Régimen de Caudales Ecológicos como antecedente para la preservación del Ecosistema Acuático en el Meandro del Río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán*. Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Morelia, Michoacán, agosto de 2011.

CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional) (2003): *“Evaluación física, química y biológica del río Lerma (meandro) a la altura de la Ciudad de La Piedad, entre los estados de Guanajuato y Michoacán”*, Mexico.

CONACYT (2007). *Saneamiento del cauce natural (meandro) del río Lerma e integración del mismo a la dinámica urbana de La Piedad, Michoacán*. La Piedad Michoacán 2007

CONAGUA (2012). *Contabilidad Hidrológica de la Cuenca del Río Lerma*. SEMARNAT 2012.

Departamento Conservación y Protección de Recursos Hídricos Chile (1998). *Análisis de criterios hidroambientales en el manejo de recursos hídricos. Diseño plan de monitoreo para la determinación de caudales ecológicos*. Santiago, Noviembre, 1998.

Díez Hernández J y Martínez de Azagra A. (2012). *Directrices para la modelación hidráulica de caudales ambientales mediante la metodología IFIM*. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología, Universidad de Valladolid. Palencia (España).

García de Jalón D. y Gonzales del Tango M. (1998). *El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles*. I Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación del Agua 14-18 Septiembre. España.

García de Jalón D., Mayo-Rustarazo M. (2000). *Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos .Adaptación del método IFIM-PHABSIM y aplicación a los ríos españoles*. Departamento de ingeniería forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.

García Rodríguez E. (2011). *“Determinación de un régimen de caudales ecológicos para el cauce natural (meandro) del río Lerma, que atraviesa la zona conurbada de La Piedad, Michoacán y Santa Ana Pacueco, Guanajuato”*. Informe final del subproyecto. Área ingeniería ambiental. Proyecto 73881 CONACYT-Gobierno del Estado de Michoacán-U.M.S.N.H.:“Saneamiento del cauce natural (meandro) del Río Lerma e

integración del mismo a la dinámica urbana de La Piedad Michoacán”.
Morelia, Michoacán, México. 45 páginas.

García-Rodríguez E., Martínez-Austria P., García de Jalón-Lastra D. Martínez-Capel F., (2008). *Simulación del hábitat físico en un tramo del río Lozoya, utilizando es sistema PHABSIM*. Ingeniería hidráulica en México, vol. XXIII, núm. 4, pp. 41-52, octubre- diciembre de 2008.

García-Rodríguez E., y Ochoa-Franco L.A. (2008). *Metodologías para la Determinación de Regímenes de Caudales Ecológicos y su Factibilidad de Aplicación en México*. 4° Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología. Morelia, Michoacán, México.

Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., Inc. New York. 522 pp.

Miller, W. L. Minckley y Steven Mark Norris, Martha Hall Gach 2009. Peces dulceacuícolas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.

Plan de Desarrollo Municipal de La Piedad, Michoacán (2012-2015). Gobierno Municipal de La Piedad. http://www.lapiedad.gob.mx/pdfs/5e9792_PDM%202012_2015.pdf .México. Consultado en la Red en Febrero de 2013.

Platts, W. S., W. F. Megahan, y G. W. Minshall. (1983): *Methods for evaluating stream riparian, and biotic conditions*. USDA Forest Service, General Tech. Report. INT-138. Ogden, UT. 70 pp.

Secretaría de Economía (SE) (2012). *Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. México, D.F. 123 p.

Stalnaker, C., Lamb, B.L., Henriksen, J., Bovee K., and Bartholow, J. (1995): *The Instream Flow Incremental Methodology, A primer for IFIM*. Biological Report 29. U.S. Department of the Interior, National Biological Service. Washington, D.C.. 44 pp.

USGS (2001). *PHABSIM para Windows. Manual de Usuario y Ejercicios*. Midcontinent Ecological Science Center, U.S.A.

Tharme, R. E. (2003): *A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers*. RIVER RESEARCH AND APPLICATIONS 19: p. 397–441. Wiley InterScience.

ANEXOS

DEFINICIONES DE TÉRMINOS Y NOMBRES DE PROGRAMAS UTILIZADOS

Altura de la superficie libre del agua (ASLA): La elevación de la superficie del agua en relación a una referencia (*e.g.* banco de nivel).

Ancho: La distancia a través de un canal en la superficie del agua medida normal al flujo.

Ancho mojado: Ancho de un río a nivel de la superficie libre del agua.

Área sección-transversal: El área de la sección que contiene agua, perpendicular a la dirección de flujo. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

Área utilizable: La superficie de un río que puede ser utilizada por un organismo acuático. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

Área Utilizable Ponderada o Hábitat Potencialmente Utilizable (WUA-Weighted Usable Area): La superficie de un río medida en relación a su idoneidad para un organismo acuático. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

Celda: Tal como se utiliza en PHABSIM, un incremento de ancho del canal de un río ponderado por su importancia relativa, por longitud en un área dada, definido por verticales.

Cobertura: Áreas de refugio en un canal de un río que proporcionan a organismos acuáticos protección contra los depredadores y/o un lugar para descansar y conservar la energía debido a una reducción de la fuerza de la corriente o camuflaje visual; por ejemplo: pozas, taludes, rocas, aguas profundas, turbulencia superficial, etc.

Curvas de conveniencia de uso (SI): Igual que las curvas de preferencia excepto que se enfatiza el concepto de la conveniencia de las condiciones para un organismo específico.

Curvas de preferencia: Los criterios utilizados para medir un área como una valoración de preferencia para un organismo acuático específico. El organismo prefiere determinadas condiciones.

Descarga: La tasa de flujo (Q), o volumen de agua que fluye en un río en un lugar determinado y en un determinado tiempo, expresado como pies cúbicos sobre segundo, en unidades inglesas, o en metros cúbicos sobre segundo, en el sistema internacional.

Estadio de vida: Una clasificación arbitraria de la edad de un organismo en las fases relacionadas con la morfología del cuerpo y potencial reproductivo, por ejemplo: “edad media” para el hombre y “juvenil” para los peces.

Factor de ajuste de velocidad (VAF): La relación de la descarga o caudal para la cual las velocidades están siendo simuladas, respecto a la suma de de velocidades de celda de simulación por las áreas de celda.

Hábitat físico: El lugar donde vive una población y sus alrededores como se define en las condiciones físicas, más comúnmente profundidad, velocidad y condiciones del cauce tales como sustrato y objetos que constituyan cobertura.

IFIM: Instream Flow Incremental Methodology.

Macrohábitat: Las condiciones del hábitat en una fracción del río que controlan la distribución longitudinal de los organismos acuáticos.

Marcas de referencia: Los puntos terminales en una sección transversal. Por lo general marcada por algo en el terreno (*e.g.* un trozo de varilla). Por

convención, la primera marca o de inicio, se hace en la rivera izquierda viendo hacia aguas arriba.

Microhábitat: Área pequeña del hábitat (celda) de un río que define lugares específicos o rangos de hábitat.

Nivel: La elevación o distancia vertical de la superficie de agua respecto a una referencia.

Perfil longitudinal: Línea de las alturas o elevaciones situadas a lo largo, que en el caso por un río normalmente representan el Thalweg. Más a menudo incluye las elevaciones del fondo y de las elevaciones en la superficie libre del agua.

Profundidad, Thalweg: La distancia vertical del punto más bajo de un canal, en una sección transversal, respecto a la superficie libre del agua; es decir, la profundidad máxima del agua en una sección transversal.

Perímetro mojado: El contorno de una sección transversal en su zona mojada. Las unidades pueden ser pies o metros.

PHABSIM: Sistema de Simulación de Hábitat Físico. Sirve la calcular una relación entre caudales y hábitat físico, para diversos estadios de vida de un organismo acuático o una actividad recreativa. PHABSIM es un componente de la metodología IFIM.

Rabión: Rápidos poco profundos en un río, donde la superficie del agua forma olas por obstrucciones total o parcialmente sumergidas.

Radio Hidráulico: Relación del área transversal al perímetro mojado $R = A/p$. Para canales superficiales relativamente amplias, R se aproxima a la profundidad hidráulica.

Remanso: (1) Una región de un río donde el nivel de superficie de agua se rige por un control indirecto (el término paso-remanso se aplica al modelo WSP). (2) Una saliente del canal principal con poco flujo y donde la elevación de superficie de agua se mantiene por las condiciones en el canal principal.

Rugosidad de canal: Un coeficiente de Resistencia al flujo, causada por el tamaño de las partículas que conforman el lecho y taludes del conducto o fricción por presencia de vegetación y características de canal, tal como sinuosidad alta y construcciones, que provocan pérdida de energía en el movimiento del flujo.

Sección transversal: Una sección a través de un canal de un río que es perpendicular a la dirección del flujo.

Sustrato: El material que se encuentra en la parte inferior del canal de un río, por ejemplo, limo, arena, rocas, vegetación, etc.