

Los Caudales Ambientales o Ecológicos en los Ríos: Obtención de la Información del Hábitat Físico Hidráulico para Alimentar un Modelo Bidimensional de la Hidrodinámica

Dr. Ing. Ezequiel García Rodríguez¹

Resumen: Actuar en el marco del desarrollo sostenible implica el utilizar racionalmente los recursos hídricos con la finalidad de conservar los ecosistemas asociados. Los regímenes de caudales ambientales o ecológicos se establecen para mantener los ecosistemas fluviales en buenas condiciones, y una de las metodologías que más se utilizan para tal fin es la basada en la simulación del hábitat físico. La obtención de la información de la hidrodinámica para efectuar la simulación del hábitat físico fluvial es uno de los trabajos especializados en los que se utiliza una cantidad importante de recursos, y su calidad es fundamental para efectuar una correcta determinación de los requerimientos hídricos correspondientes. Con la finalidad de que tales trabajos se realicen de la mejor manera y que se aprovechen tiempo y demás recursos adecuadamente, en el presente trabajo se presenta el proceso de obtención de las alturas de la superficie libre del agua, de la distribución de velocidades, y de los elementos físicos del hábitat relacionados con el comportamiento del flujo, para diferentes caudales. Finalmente, se presenta información a utilizar en la calibración y simulación de la hidrodinámica fluvial mediante un modelo bidimensional de la hidrodinámica fluvial, aportando, como resultado, información técnica y práctica valiosa a utilizar en trabajos de conservación de los ecosistemas de los ríos.

Palabras clave: Caudales ambientales o ecológicos, Simulación del hábitat físico fluvial, modelo bidimensional de la hidrodinámica.

Introducción

Utilizar racionalmente los recursos hídricos, con la finalidad de conservar los ecosistemas asociados, es actuar en el marco del desarrollo sostenible. Para mantener los ecosistemas fluviales en buenas condiciones, se establecen en los mismos los regímenes de caudales ambientales o ecológicos, y una de las metodologías hidrobiológicas que más se utiliza para tal fin es la basada en la simulación del hábitat físico, incluida en la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012) que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. En la simulación del hábitat físico fluvial se utilizan modelos bidimensionales de la hidrodinámica, y la obtención de la información de la hidrodinámica para efectuar tal simulación es uno de los trabajos especializados en los que se utiliza una cantidad importante recursos, y su calidad es fundamental para efectuar una correcta determinación de los requerimientos hídricos correspondientes. Con la finalidad de que tales trabajos se realicen de la mejor manera y, por lo tanto, que se aprovechen tiempo y demás recursos adecuadamente, en el presente trabajo se presenta el proceso de obtención de la información hidráulica (alturas de la superficie libre del agua, de la distribución de velocidades, y de los elementos físicos del hábitat relacionados con el comportamiento del flujo) para alimentar un modelo bidimensional de la hidrodinámica aplicado a la simulación del hábitat físico, y se aporta información técnica y práctica para la determinación de regímenes de caudales que permitan conservar los ecosistemas de los ríos; además, la determinación de tales caudales permite estar en condiciones de establecer la disponibilidad de agua para otros usos.

Desarrollo

Metodología

La simulación del hábitat físico hidráulico se utiliza en las metodologías hidrobiológicas para determinar los requerimientos hídricos de los ecosistemas fluviales. Esta simulación del hábitat integra dos componentes fundamentales de los ecosistemas fluviales: la estructura física del hábitat (forma del cauce, distribución del sustrato y cobertura vegetal; Karr *et al.*, 1978, en Milhous *et. al.*, 1989) y el régimen de flujo (Karr *et al.*, 1978, en Milhous *et. al.*, 1989), componentes que condicionan la productividad del hábitat, y cuya integración se efectúa mediante la obtención de información hidrométrica, topográfica y biológica perteneciente al río en estudio. En el apartado biológico de la simulación del hábitat, se asume que los organismos acuáticos utilizarán el hábitat en función de lo adecuado o conveniente que sea para su desarrollo, y que se pueden desarrollar modelos que relacionan los caudales circulantes por el río con el grado de conveniencia para los organismos acuáticos. En función de los modelos antes mencionados

¹ El Dr. Ing. Ezequiel García Rodríguez es profesor de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil. Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México.
ezequiel.garcia@umich.mx

y los caudales que fluirían por el cauce, se obtiene una curva que relaciona la estimación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) por los organismos objetivo con los caudales que circularían por el río en estudio. La curva caudal-HPU constituye la base para diseñar un régimen de caudales ecológicos o ambientales y, por lo tanto, aporta información básica para determinar el volumen de recursos hídricos que sería factible utilizar para otros fines.

Modelización de hidrodinámica fluvial en dos dimensiones (2D)

En la evaluación del hábitat físico se utilizan los modelos bidimensionales de la hidrodinámica fluvial (*e.g.*, Steffler *et al.* 2010), puesto que permiten simular adecuadamente el movimiento del flujo en cauces naturales, en los que la presencia de curvas, islas, expansiones y contracciones propician flujo dividido y transversal y, por lo tanto, permiten identificar las variaciones localizadas de las velocidades y las profundidades del agua.

En la simulación del hábitat fluvial utilizando modelos bidimensionales de la hidrodinámica, el tramo de río en estudio se divide en celdas y se establecen secciones transversales de apoyo, en las que se obtienen las características hidráulicas mediante la simulación de la hidrodinámica para cada caudal de interés. La disposición de las celdas de cálculo y la manera en que se estima la velocidad y la profundidad del agua en cada una de ellas, cuando se utiliza un sistema de simulación bidimensional de la hidrodinámica; estos se muestran en la Figura 1.

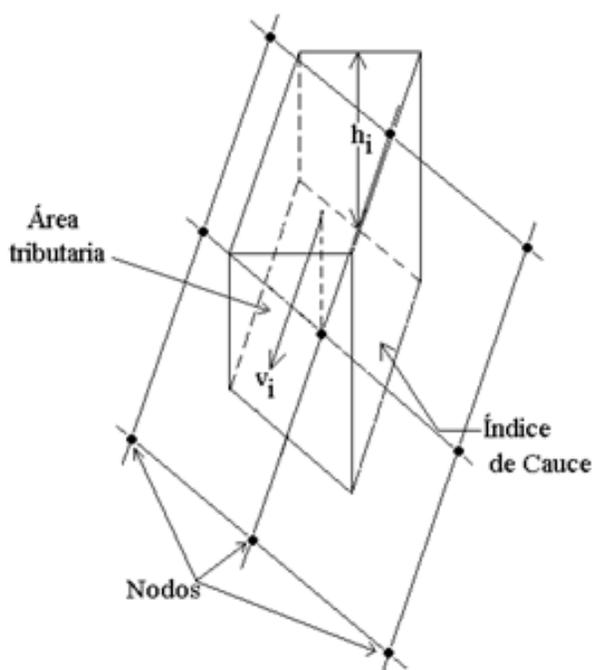


Figura 1. Características de la celda de cálculo del hábitat en la modelización bidimensional de la hidrodinámica fluvial.

Uno de los métodos de discretización que suelen utilizar los modelos computacionales basados en las ecuaciones del flujo bidimensional de la hidrodinámica fluvial, con la mejor flexibilidad geométrica (Steffler y Blackburn, 2002), es el método de los elementos finitos. Para aplicar este método se requiere información geomorfológica e hidráulica, en cantidad y con la calidad suficiente para que los resultados sean adecuados.

Obtención de datos de campo

En los sistemas de simulación del hábitat, los datos hidráulicos necesarios para la calibración de los modelos de la hidrodinámica fluvial con enfoque bidimensional, consisten, como mínimo, en un juego de velocidades y tres juegos de alturas de la superficie libre del agua (ASLA), medidas para tres caudales diferentes, en la sección transversal de salida del flujo (*i.e.*, la sección situada más aguas abajo) y las correspondientes ASLA's en la sección de entrada del tramo o tramos del estudio (las tres ASLA's se utilizan en la construcción de la curva de calibración de esta última sección). Cabe mencionar que es conveniente aumentar a cuatro juegos de velocidades, tanto en la sección de entrada como en la de la salida del tramo de estudio para cuatro caudales diferentes, así como obtener las alturas del agua correspondientes para los mismos cuatro caudales; lo anterior se aborda con la finalidad de contar con tres juegos de

velocidades para efectuar la calibración del modelo, así como para poder construir las curvas de calibración caudal-altura del agua con tres juegos de datos, de tal manera que el juego de velocidades y la relación caudal-altura restantes se utilizarán en la simulación a "ciegas" para verificar la calidad de la calibración del modelo y de las simulaciones correspondientes.

Selección de caudales objetivo

La obtención de los caudales objetivo se realizó en un rango de caudales adecuado, para lograr la mejor definición posible de las curvas de calibración de las secciones transversales: se deberá incluir, como mínimo, un caudal bajo o pequeño, un caudal medio y otro alto, para propiciar la cobertura del mayor rango de caudales posible.

Cabe mencionar que se deben tener en cuenta otros aspectos temporales al obtener los datos de campo, como son el crecimiento estacional de la vegetación en el cauce (ya que aumenta la rugosidad desde el punto de vista hidráulico, y desde el punto de vista biológico proporciona alimento y refugio a los organismos acuáticos).

Además de obtener los datos hidráulicos mencionados, para las secciones de entrada y salida del tramo o tramos de estudio, es recomendable ubicar secciones transversales (figura 2) en los controles hidráulicos del tramo de estudio, así como en los puntos situados entre dichos controles, de tal manera que permitan definir adecuadamente el perfil longitudinal general del cauce, las variaciones del cauce en planta (zonas estrechas y anchas), zonas de flujo dividido, así como los perfiles de flujo y la existencia de entradas de tributarios y/o extracciones de agua. Esto se debe lograr con la finalidad de obtener información hidráulica (*i.e.* alturas del agua y distribución de velocidades) que sirva para efectuar la calibración del modelo, no solo con datos de las secciones de entrada y salida, sino también con datos de otras secciones importantes, así como efectuar la simulación a "ciegas" en secciones complementarias.

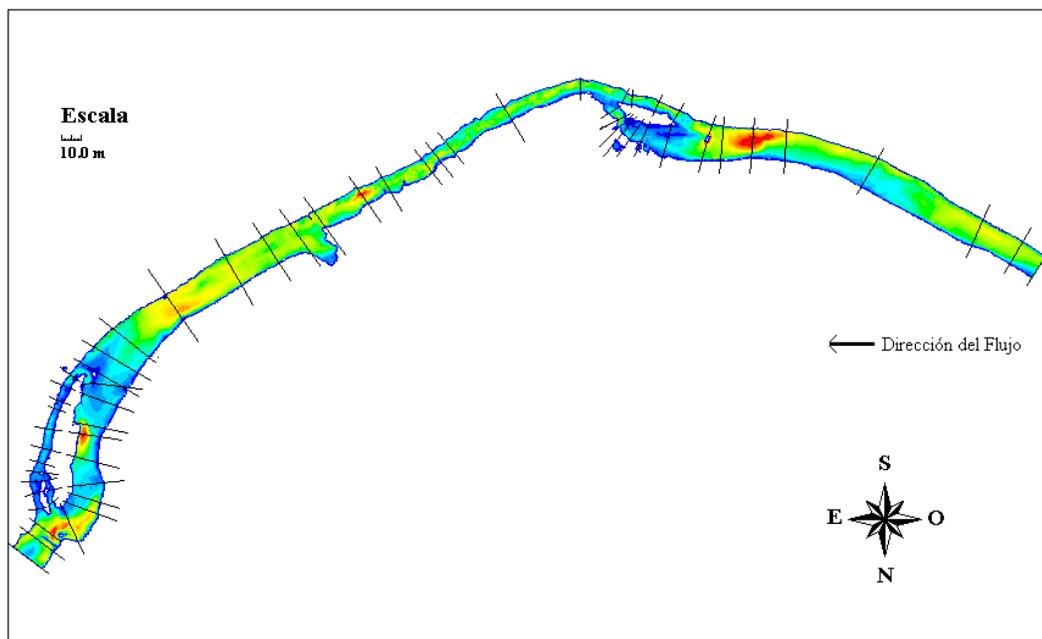


Figura 2. Ubicación de secciones transversales en un tramo de río para efectuar la simulación del hábitat físico.

En el tramo de río que se muestra en la figura 2 se colocaron un total de sesenta secciones transversales fijas, 39 en el cauce principal y 21 en los cauces secundarios.

En las secciones transversales que se muestran en la figura 2 se colocaron varillas de acero, cuando menos en los extremos de cada sección, a las cuales se les asignaron coordenadas X, Y, Z, para que constituyeran la referencia horizontal y vertical estable de las mismas secciones, durante la duración de los trabajos de obtención de la información de campo.

Ubicación del nivel de referencia

En el tramo de estudio de la figura 2 se colocaron 230 marcas de referencia constituidas por varillas de acero, y mediante una de ellas se estableció un nivel general de referencia o banco de nivel, respecto a cuyas coordenadas se efectuaron los trabajos topográficos; y otras de estas marcas constituyeron la poligonal abierta de apoyo, situada a lo largo del tramo de estudio que sirvió para determinar las coordenadas del resto de las marcas de referencia, particularmente de las marcas de las secciones transversales.

Topografía para el modelo bidimensional

En el levantamiento topográfico del tramo de río en estudio se utilizó equipo convencional de topografía (*i.e.*, estación total), así como ecosondas y GPS topográfico, según sean las necesidades.

Para representar la morfología del cauce con enfoque bidimensional, y generar adecuadamente los datos que se requieren para la modelización, se obtuvieron las *líneas características* (Christison, *et al.*, 1998; Waddle *et al.*, 2000), complementadas con un recorrido en la zona por la que se espera que circulen los caudales de interés, obteniendo todos aquellos puntos que permitan captar las variaciones significativas de altitud y las secciones transversales que permitan incluir los cambios importantes en la configuración transversal del cauce.

En la figura 3a se puede ver una parte de un tramo de río con sus líneas características. Dada la relación directa entre la calidad de la definición de la morfología fluvial y los resultados de la modelización de la hidrodinámica fluvial con enfoque bidimensional, para obtener las curvas de nivel de la figura 3a se utilizan tantos puntos como sean necesarios, para efectuar la triangulación de estos puntos figura 3b, y obtener una representación lo más cercana posible, en el modelo, de las curvas de nivel reales del cauce figura 4.

En las secciones transversales del cauce se debe tener en cuenta, también, un número mínimo recomendable de puntos para la medición de las velocidades (Herschy, 1999).

Resultados

Obtención de datos hidráulicos: Medición de velocidades, profundidades o tirantes del agua, y aforo o determinación de gastos o caudales

Las velocidades medias del agua se miden en la vertical de cada punto definido en el levantamiento topográfico de las secciones transversales, para los caudales de muestreo. Cuando el tirante o profundidad del agua es igual o mayor a 1 m se obtiene la velocidad mediante la media aritmética de las velocidades medidas en los puntos situados a 0.2 y 0.8 de la profundidad respecto a la superficie libre del agua. Cuando el tirante sea inferior a 1 m se utiliza como velocidad media la velocidad del agua medida en el punto situado a 0.6 de la profundidad respecto a la superficie libre del agua (Herschy, 1999).

Para medir el calado durante los aforos, se utiliza una regla graduada al mm (*i.e.*, profundímetro), o una ecosonda. En los puntos ubicados en zonas en las que la superficie del agua no es “plana” y/o se observan fluctuaciones (*e.g.*, en los rabiones), se efectúa un mínimo de tres lecturas de la profundidad o tirante del agua para mejorar la determinación de la altura de la superficie libre del agua (ASLA).

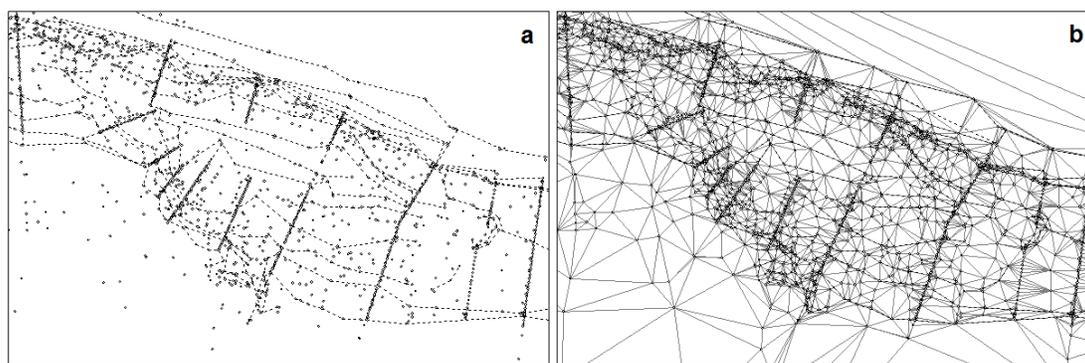


Figura 3. a. Nodos y líneas topográficas características en un tramo de río, b. triangulación de los nodos.

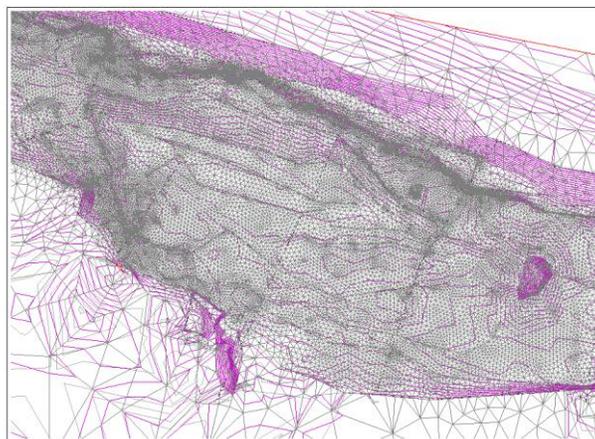


Figura 4. Ajuste de las curvas de nivel generadas con los datos topográficos obtenidos en campo y la malla de discretización obtenida mediante elementos finitos, en un tramo de río.

Para medir la velocidad puntual del agua se utiliza un correntímetro electromagnético u otro tipo de instrumento que permita realizar una medición suficientemente precisa (Figura 5). En los puntos de medición situados en zonas del cauce que tenían flujo notablemente turbulento (*e.g.*, rabiones), se efectúa la medición de la velocidad promediando una serie de lecturas realizadas en un tiempo razonable (*e.g.* 30 segundos), mientras que en el resto de puntos se efectúan lecturas durante 10 segundos. Cabe señalar que los instrumentos de medición se deben calibrar previamente al inicio de las campañas de medición.

Se determina la distancia del punto de medición al elemento de marqueeo o varilla de referencia situado en la orilla de la sección transversal, a la par con la obtención de las velocidades medias.

La altura de la superficie libre del agua (ASLA) se obtiene durante la realización de los aforos en cada sección transversal.

En la figura 6 se observa: a. el perfil del terreno de una sección transversal y las ASLA's obtenidas para tres caudales diferentes, y b. la distribución de velocidades, en la misma sección transversal, para los mismos tres caudales.

Los perfiles de flujo a lo largo del cauce, para los diferentes caudales de medición, se obtienen con las ASLA's obtenidas para cada una de las secciones transversales (Figura 7). En la misma Figura 7 se observa el correspondiente perfil natural de profundidades máximas del terreno (*thalweg*). Con las ASLA's que se construyeron los perfiles de flujo antes mencionados, se obtiene, también, la pendiente longitudinal de la superficie libre del agua para de utilizarla en los cálculos hidráulicos en los que se requiera.

Para la simulación de la hidrodinámica, con las características obtenidas del cauce, se determina el coeficiente de rugosidad “*n*” de Manning utilizando valores típicos contenidos en tablas de la bibliografía relacionada con el tema. En el cuadro 1 se encuentran algunos valores típicos del coeficiente de rugosidad de Manning para cauces fluviales naturales.

Algunos modelos bidimensionales de la hidrodinámica fluvial utilizan el coeficiente adimensional de Chezy para representar la fricción del cauce, que se relaciona con el parámetro de magnitud de la rugosidad k_s , y la profundidad H , mediante la ecuación 1 (Steffler y Blackburn, 2002):

$$C_s = 5.75 \log \left(12 \frac{H}{k_s} \right) \quad (1)$$



Figura 5. a. Medición de la velocidad del agua (izquierda), b. equipo electromagnético de medición, con accesorios.

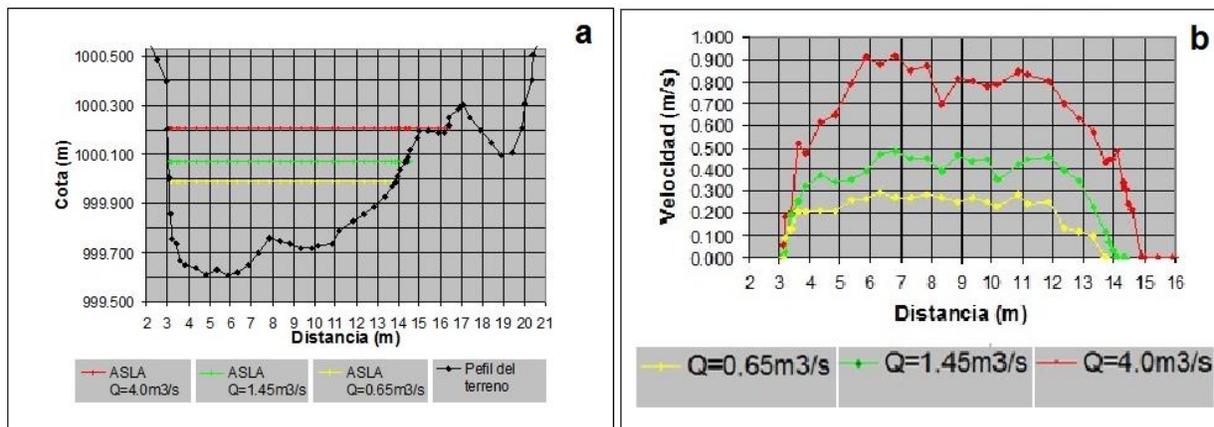


Figura 6. a Perfil de la sección transversal de un río con las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) obtenidas para tres caudales (Q) diferentes, b Perfiles de velocidades obtenidos para tres caudales (Q) diferentes.

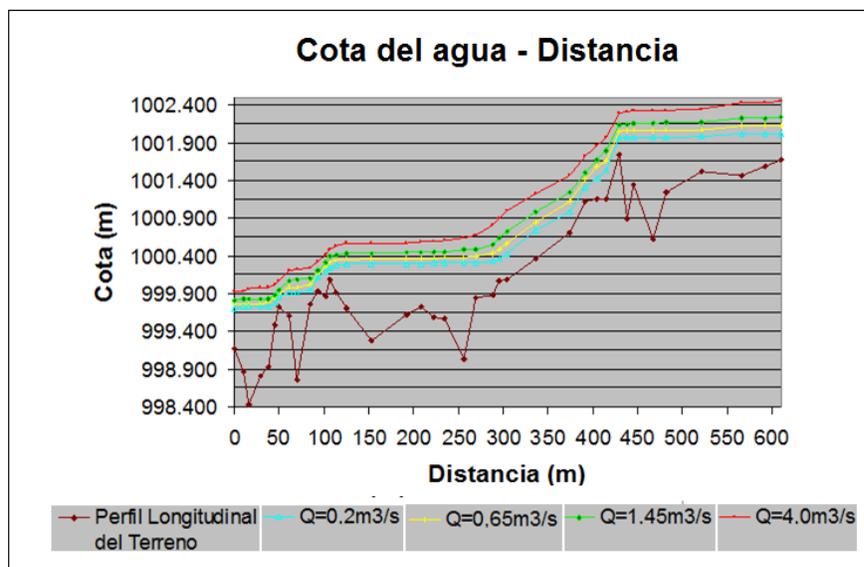


Figura 7. Perfiles de flujo obtenidos en un tramo de río, para cuatro caudales (Q) diferentes.

Para efectuar la modelización bidimensional el parámetro de magnitud de la rugosidad k_s , (en m), se estima con base en el D_{50} de los materiales del lecho del cauce o el diámetro del obstáculo (cuadro 1).

El tipo de sustrato del cauce, para la modelización bidimensional de la hidrodinámica, se obtiene a la par con la topografía del mismo cauce.

El sistema que se utiliza para la clasificación del sustrato y los correspondientes códigos numéricos introducidos en el proceso de simulación del hábitat se encuentra en el cuadro 1. Se trata de una simplificación de la clasificación utilizada 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 un mayor número de subdivisiones.

En el tipo de sustrato denominado “Limo” se incluyeron las partículas con diámetro inferior a 0.062 mm, por lo que en este descriptor quedan incluidas las arcillas.

Cuadro 1. Tipos de sustrato y rango de tamaños para determinar la Magnitud de rugosidad para la simulación de la hidrodinámica (D_{50} = Diámetro de las partículas que constituyen el 50% de la muestra, D_a = Diámetro del árbol).

| Tipo de Sustrato | Magnitud de la rugosidad, k_s (m) | Rango de tamaños (mm) |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Limo | 0.1 | 0.062 |
| Arena | 0.2 | 0.062 - 2 |
| Grava | $5D_{50}$ | 2 - 64 |
| Cantos | $5D_{50}$ | 64 - 256 |
| Bloques | $5D_{50}$ | $D > 256$ |
| Roca madre | 2.0 | |
| Vegetación | 3.0 | |
| Árboles | $5D_a$ | |
| Matorral | 3.0 | |

En aquellos modelos en los que se utilice el coeficiente de rugosidad de Manning se utilizan los datos contenidos en el cuadro 2.

Cuadro 2. Valores típicos del coeficiente de rugosidad “n” de Manning para diferentes tipos y condiciones de cauce (Henderson, 1966).

| 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) |

Lo presentado en este trabajo, dará como resultado la obtención de la información suficiente y de calidad adecuada, para efectuar la calibración del modelo bidimensional de la hidrodinámica fluvial para efectuar la simulación del hábitat, tanto en función de los perfiles longitudinales de flujo como en función de la distribución de velocidades (generalmente en las secciones transversales levantadas y medidas), utilizando como referencia los datos antes mencionados, obtenidos para tres o más caudales diferentes y distribuidos en función del rango de caudales esperados en el tramo de río en estudio. Calibrado el modelo, se realizarán adecuadamente las simulaciones para los caudales no medidos, de tal manera que se pueda determinar la variación del hábitat físico disponible para la especie o especies objetivo, en función de cada caudal circulante y, en función de esta variación del hábitat, determinar los caudales ambientales o ecológicos a conservar en el tramo de río en estudio.

Conclusiones

En la simulación del hábitat físico fluvial, utilizando modelos bidimensionales de la hidrodinámica, es fundamental contar con información hidrométrica suficiente y de buena calidad para obtener resultados correctos, utilizando procedimientos adecuados. Se deben obtener las características hidráulicas para un número de caudales suficiente, en un número adecuado de secciones transversales, con la finalidad de no sub-representar las características del tramo de río en estudio y, al mismo tiempo, obtener solo los datos necesarios para utilizar en el proceso solo los recursos necesarios. Por lo antes mencionado, la obtención de información hidráulica suficiente y de buena calidad permitirá que, en primera instancia, se efectúe la calibración de los modelos que se utilicen y, posteriormente, se efectúen las simulaciones del hábitat con el nivel de precisión necesaria, para obtener como resultado la variación del hábitat físico adecuado para la o las especies que se tomen como referencia, y con estos resultados determinar un régimen de caudales ambientales o ecológicos destinados a propiciar la conservación, en condiciones adecuadas, de los ecosistemas fluviales correspondientes.

Limitaciones

En el presente escrito se trata un tipo de trabajo en el que se han cubierto de la mejor manera posible las diferentes partes o procedimientos que lo forman, sin embargo, por la extensión del tema, el autor queda pendiente de posibles comunicaciones de los lectores, mediante la dirección de correo electrónico que se incluye al final del escrito.

Recomendaciones

Se recomienda aplicar con rigor los procedimientos mencionados en el presente trabajo, con la finalidad de lograr el grado de precisión que permita que los resultados sean adecuados.

Referencias

- Christison, K.J., Katopodis, C., Steffler, P.M. and Bai, B. (1998) Defining Channel Characteristics as Feature Lines for 2D Hydrodynamic and Habitat Studies. Proceedings of The 3rd International Symposium on Ecohydraulics. Salt Lake City, Utah, USA. July 13-19. 15 pp.
- Henderson, F. M. (1966): Open channel flow. Macmillan Publishing Co., Inc. New York. 522 pp.
- Herschly, R.W. (1999): HYDROMETRY Principles and Practices. Wiley. Segunda Edición. Inglaterra. 376 pp.
- Milhous, R.T., Updike, and Schneider, D.M. (1989): Physical Habitat Simulation System Reference Manual - Version II. Instream Flow Information Paper No. 26. U.S. Fish and Wild. Serv. Biol. Rep. 89 (16). v.p.
- 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. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos (2012): Norma Mexicana (NMX-AA-159-SCFI-2012) Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. México. 123 pp.
- Steffler, P., Blackburn, J. (2002): River2D-Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat. University of Alberta. User's Manual. 119 pp.
- Steffler, P., Ghanem, A., Blackburn, and Yang Z. (2010): River2D Version 0.95a. University of Alberta, Edmonton. Canada.

Waddle, T.; Steffler, P.; Katopodis, C.; and Locke, A. (2000): Comparison of one and two-dimensional open channel flow models for a small habitat stream. *Rivers*, Vol. 7, Number 3, pp. 205-220.

Nota Biográfica

El Dr. Ing. Ezequiel García Rodríguez es profesor e investigador de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México. ezequiel.garcia@umich.mx