

OPTIMIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL EN LOS ANÁLISIS IFIM-PHABSIM DEL HÁBITAT ACUÁTICO

Juan Manuel Díez Hernández y Andrés Martínez de Azagra
Grupo de Hidráulica e Hidrología. ETS. Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid.
Av. Madrid, 57. 34004 Palencia. Correo-e: jmdiez@iaf.uva.es

Resumen

La modelación de velocidades y profundidades es un elemento esencial del sistema ecohidráulico PHABSIM, que condiciona el coste de un estudio. Con el objetivo de identificar la información de campo mínima para un estudio IFIM de caudales, se han analizado 90 secciones representativas de tres hábitats (rápidos, tablas y remansos) en tramos fluviales de tres órdenes de magnitud (alta-pendiente, media-pendiente y baja-pendiente). Los resultados revelan que la simulación del hábitat es sensible a los errores en la estimación de los Niveles de Superficie Libre (NSL), pero robusta respecto al algoritmo predictivo de las velocidades. La acción conjunta de estos hechos posibilita unas relaciones funcionales hábitat-caudal confiables para un estudio IFIM de precisión estándar, derivadas de las mediciones de tres NSL y una distribución horizontal de velocidades. Dentro del laberinto de técnicas aplicables en PHABSIM, los modelos hidráulicos en una dimensión producen unas respuestas aceptables para los estudios IFIM. El procedimiento que recomendamos para los estudios IFIM normales de caudales ambientales optimiza el balance precisión-coste de la simulación: consiste en modelar los NSL a partir de tres observaciones, y las velocidades mediante el modelo "1-vel" calibrado con un único perfil de velocidades asociado al caudal mayor medible con seguridad.

Palabras clave: PHABSIM, simulación hidráulica, velocidades, hábitat fluvial.

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que el caudal es una variable esencial de un ecosistema lótico, que condiciona la distribución y abundancia de las especies riparias y regula los procesos geomorfológicos, físicos, químicos y biológicos del ecosistema, determinando de modo notable su estado ecológico (RESH ET AL., 1998).

Con el objetivo de salvaguardar la integridad estructural y funcional de los ecosistemas acuáticos, ha entrado en vigor en el ámbito Europeo la Directiva Marco de Aguas (OJEC, 2000), que concreta la obligación de los Estados miembros en cuanto a la protección y regeneración de sus ríos, lagos y aguas de transición, en relación a lograr un "buen" estado ecológico en estos ecosistemas antes del año 2015. El régimen de caudales constituye un indicador esencial del estado ecológico de un río según esta Directiva, puesto que además de condicionar los otros indicadores de calidad hidromorfológicos, está vinculado con los de la calidad biológica, químico-física y los de contaminantes específicos.

Desde hace algo más de dos décadas, los modelos clásicos de resistencia hidráulica en conducciones abiertas se usan progresivamente para simular las condiciones ecológicas del hábitat acuático. Este nuevo ámbito denominado "Ecohidráulica" apareció en la zona oeste de Estados Unidos para estipular las necesidades de hábitat físico de los ecosistemas fluviales afectados por alteraciones del régimen natural de caudales. Un enfoque utilizado ampliamente para este propósito (DUMBAR ET AL. 1998; KING ET AL. 1999) es la metodología IFIM ("Instream Flow Incremental Methodology"), que incorpora el modelo conceptual PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System") propuesto por BOVEE (1982) para evaluar el efecto de una variación de caudal en la disponibilidad de hábitat físico en un tramo fluvial y fijar unos caudales aceptables.

La simulación hidráulica es un componente básico de PHABSIM que proporciona las profundidades y velocidades medias en cada punto de una malla estructurada que conforma el sistema de representación del cauce. Estas predicciones se combinan adecuadamente con unos Criterios seleccionados de Idoneidad del Hábitat del organismo objetivo, para desarrollar las decisivas relaciones funcionales entre el Caudal y un Índice de Idoneidad del hábitat acuático (generalmente la Superficie Ponderada Útil – "SPU"). El enfoque clásico en una dimensión (1D) simplifica la variabilidad morfológica de un tramo fluvial en varias secciones transversales representativas, conceptualizadas como compuestas de múltiples subsecciones rectangulares ("celdas"), cuya agregación global constituye una malla de paralelogramos que abarca todo el dominio de flujo modelable. La simulación hidráulica convencional de PHABSIM (BOVEE ET AL., 1998; WADDLE, 2001) aplica métodos estadísticos simples y ecuaciones de flujo permanente seleccionables, para predecir secuencialmente las profundidades y las velocidades medias en cada celda, dentro de un intervalo de caudales delimitado.

Las profundidades simuladas para un determinado caudal derivan del correspondiente NSL, deducido de la curva de gasto de la sección transversal calculada mediante alguno de los siguientes esquemas de solución para un flujo permanente, los cuales consideran la variación inherente de la rugosidad con el caudal en las corrientes naturales: 1) fórmula de Manning para un régimen uniforme, aplicada con una conductividad variable en un área de flujo efectiva (modelo MANSQ); 2) método del "paso estándar" para un régimen gradualmente variado en secciones compuestas, con un patrón definido de variación del coeficiente de Manning con el caudal (modelo WSP); 3) ajuste de regresión lineal bilogarítmica de mínimos cuadrados entre el NSL y el Caudal (modelo STGQ); o bien la 4) entrada directa de las predicciones con otras técnicas externas (p.ej. HEC-RAS). Durante la simulación de velocidades se conceptúa cada sección transversal como compuesta de múltiples celdas, en cada una de las cuales se asume un flujo permanente y uniforme que se resuelve mediante tres técnicas configurables que emplean diferente número de distribuciones de velocidades observadas. La primera denominada "3-velocity regresión" es aplicable con tres o más distribuciones, y ajusta una regresión bilogarítmica lineal entre la velocidad media en una celda y el caudal total. El segundo método "1-velocity" emplea una distribución de velocidades, presuponiendo un flujo unidimensional estricto que resuelve mediante una expresión conjunta de las ecuaciones de Manning y de continuidad, simplificada en cada celda para deducir un coeficiente de rugosidad que se considera constante. En ausencia de distribuciones de velocidades observadas, el tercer método "no-velocity" aplica en todas las celdas la misma expresión simplificada del anterior "1-velocity", pero con unos coeficientes de rugosidad prefijados por el modelador, para lograr un cumplimiento aceptable de la ecuación de continuidad.

2. METODOLOGÍA

Se han estudiado un rango amplio de condiciones ecohidráulicas frecuentes en corrientes aluviales, que incluyen tres tipos básicos de hábitat (rápidos, tablas y remansos) y tramos fluviales característicos de tres órdenes de magnitud (alta-pendiente, media-pendiente y alta-pendiente). Los datos de campo provienen de varios estudios PHABSIM elaborados en California y han sido extraídos del archivo informático de la consultora Thomas R. Payne & Associates (Arcata-CA, USA). El protocolo de medición en campo siguió básicamente las directrices estipuladas en los manuales de PHABSIM referenciales (TRIHEY & WEGNER, 1981; MILHOUS ET AL. 1984; BOVEE, 1997), incorporando unas pruebas suplementarias para controlar la calidad de la información topográfica e hidráulica. El aforamiento de

cada sección se efectuó conforme a las directrices definidas por RANTZ (1982), estableciendo un mínimo de 20 celdas mojadas y no menos de 15 verticales mojadas durante el caudal menor). En cada sección se han medido con correntímetros mecánicos de eje vertical del tipo “PriceAA y pygmy” las distribuciones horizontales de velocidades completas ligadas a tres caudales observados que abarcan el rango de flujo modelable. La modelación ecohidráulica completa se ha desarrollado con la versión en español del paquete informático RHABSIM 3 (“Riverine Habitat Simulation Software”: TRPA, 2004). El Índice de Hábitat (SPU) se ha simulado dentro del rango aceptado (BOVEE & MILHOUS, 1978), según el esquema HABTAE con cuatro criterios de preferencia genéricos que combinan rangos definidos de velocidad y profundidad (zonas rápidas/someras, rápidas/profundas, lentas/someras, y lentas/profundas), empleando una agregación geométrica de preferencias, y un tratamiento de celda central que posibilita relacionar las predicciones hidráulicas y ecológicas.

Se han analizado las discrepancias entre las velocidades observadas y las simuladas en cada celda, en términos de errores absolutos y relativos, así como las desviaciones típicas para cada caudal simulado. Agregando jerárquicamente estos errores en cuatro niveles (caudal–celda–sección–hábitat) se han calculado los Errores Relativos Medios (ERM) y los Errores Absolutos Medios (EAM), así como sus correspondientes desviaciones típicas, que expresan el desatino de las predicciones en un hábitat determinado. Mediante el análisis comparativo de los estadísticos anteriores y la interpretación de los ajustes de regresión lineal que minimizan el error absoluto de simulación, se identificarán los algoritmos más exactos y consistentes en cada hábitat físico. Un enfoque similar se ha seguido con los valores del hábitat (SPU) observados y simulados en cada sección transversal.

3. RESULTADOS

3.1. Modelación Hidráulica

Los errores relativos de simulación de NSL han sido menores del 1% y comparables a los resultados de los estudios previos. Los errores absolutos han variado de 1 mm a 4 mm, magnitud que expresa la inexactitud de los NSL a la modelación de las velocidades. La Tabla 1 ilustra el efecto del error de modelación de NSL en la predicción de las velocidades y del hábitat. Se muestra el Incremento del Error relativo promedio de simulación de Velocidades (IEV) y del Hábitat (IEH) generados por cada esquema predictivo de velocidades al utilizar unos NSL precalculados inexactos (simulación conjunta). Los valores del IEV (izquierda) varían en el rango de 0,7% al 8%, siendo en muchos casos mayores del 1%. El método superior “3-vel” revela una sensibilidad menor a medida que disminuye el gradiente del tramo. El algoritmo secundario “1-vel” calibrado con el caudal alto produce unos IEV mayores en todos los ambientes. Las magnitudes del incremento del error en el hábitat denotado por el IEH (derecha) que se han encontrado son significativamente mayores que sus respectivos incrementos en la simulación de las velocidades (IEV), variando entre el 3% y el 18%. En lo referente a la modelación del hábitat, es evidente que “1-vel” es el método más robusto, disminuyendo su eficiencia a medida que aumenta la pendiente del tramo.

Para evaluar las respuestas de las técnicas de simulación de velocidades, hemos comparado las velocidades observadas y las simuladas para los tres caudales referenciales en cada una de las celdas seleccionadas al azar dentro de las secciones representativas de cada hábitat. La muestra ha consistido en unas 120 velocidades observadas para cada hábitat, lo que supone unas 360 para cada tramo fluvial y un total aproximado de 1000 valores. Para determinar en qué medida los tres algoritmos de simulación representan los campos de velocidades reales, se han realizado ajustes de regresión simple entre los valores observados y los estimados, de forma independiente en cada ambiente hidráulico. A modo de ejemplo se muestra en la figura 1 lo sucedido en el tramo de Baja-Pendiente (BP), con las respuestas de los tres algoritmos (columnas) en los tres hábitats (filas). De este análisis se deducen unas relaciones significativas entre las velocidades observadas y las modeladas (p.ej. Rápido # 3-vel). Por otro lado, el análisis del coeficiente de determinación r^2 revela el porcentaje de la variabilidad de la velocidad medida en un hábitat determinado que se explica mediante cada uno de los tres enfoques predictivos (p.ej. 96,4%). Se observa que la representatividad de los modelos en los tres hábitats aumenta a medida que el flujo se lentifica en el tramo.

En la tabla 2 se exponen las capacidades predictivas de cada modelo en cada una de las condiciones ecohidráulicas testadas, en términos de Errores Relativos Medios (ERM) y Errores Absolutos Medios (EAM). La configuración del modelo “1-vel” que aparece es la calibrada con el caudal alto, puesto los otros dos flujos observados han sido menos eficientes. Es evidente que el método “3-vel” consigue invariablemente los errores mínimos en todos los ambientes, con valores relativos que varían entre el 5% y el 14%, y absolutos el rango de 1,1 cm/s a 3,5 cm/s. El comportamiento del enfoque “1-vel” es mucho menos eficiente, provocando unos errores que duplican o triplican los anteriores. Finalmente, la respuesta de “no-vel” genera siempre los máximos errores, con ERM que varían entre el 40% y el 50% y EAM entre 9 cm/s y 14 cm/s. La comparación global entre los diferentes tramos fluviales revela que la previsibilidad mejora a medida que disminuye la pendiente, si bien las diferencias encontradas son limitadas.

3.2.- Modelación del Hábitat

La calidad de las predicciones del hábitat generadas con los tres modelos de velocidades se compara en la Figura 2, donde se presentan los errores relativos de la modelación hidráulica normal (secuencial NSL-velocidades). Los valores más bajos se consiguen de manera consistente con “3-vel”, y disminuyen con el gradiente del tramo. No obstante, el austero “1-vel” revela una exactitud importante, con errores menores del 6% en el tramo de alta-pendiente, del 5% en el de media-pendiente y del 3% en el de baja-pendiente. Las predicciones del simple “no-vel” peores.

Las relaciones funcionales entre el Índice de Hábitat (IH) y el caudal desarrolladas mediante los tres algoritmos convencionales han seguido un patrón similar en todas los ambientes estudiados. A modo de ejemplo representativo, se muestra en la Figura 3 lo sucedido en las tablas de los tramos de de alta-pendiente y baja-pendiente con la preferencia de zonas rápidas/someras. Dentro del rango de interpolación, la respuestas de “3-vel” son generalmente muy parecidas a las de “1-vel” con los cuatro criterios de preferencia: las discrepancias han sido menores del 3% en muchos casos. Si abarcamos todo el rango de simulación estipulado por BOVEE & MILHOUS (1978) —desde el 40% del caudal bajo hasta el 250% del caudal alto—, las diferencias han sido generalmente inferiores al 5%, y menores a medida que disminuye el gradiente del tramo.

4. DISCUSIÓN

La información de la Tabla 1 revela que el error de la modelación de NSL tiene una influencia reducida en la predicción de las distribuciones de profundidades y velocidades, pero amplifica de manera notable los errores en la simulación de la SPU. Esta propagación del error se produce de un modo distinto en cada algoritmo predictivo. La regresión lineal que ajusta cualquiera de las modalidades de “3-vel” entre el caudal y las velocidad es independiente de los NSL, por lo que una inexactitud del NSL repercute en las idoneidades de la velocidad únicamente a través del balance final de masas necesario para asegurar el régimen permanente. Por el contrario, la modelación con las técnicas “1-vel” y “no-vel” se fundamenta en unas rugosidades deducidas de un NSL simulado, por lo que un error de NSL

repercute directamente en las idoneidades de las velocidades y de las profundidades. En conclusión, nosotros pensamos que los errores de modelación de NSL no deben minusvalorarse, puesto que ejercen un efecto significativo en el índice de hábitat empleado para la toma de decisiones en IFIM. En definitiva, nuestros resultados corroboran la recomendación de utilizar al menos tres mediciones NSL-Q para obtener unos resultados confiables de calidad controlable (WADDLE, 2001; DIEZ HERNÁNDEZ, 2003).

Las predicciones del hábitat más acertadas dentro del intervalo de interpolación pertenecen a “3-vel” (Figura 2), que coincide con lo observado en los estudios previos en tramos de características comparables (BREMM, 1988; BARTZ, 1990; PAYNE & BREMM, 2003; DIEZ HERNÁNDEZ y MARTÍNEZ DE AZAGRA, 2004). La deficiente respuesta de “3-vel” en la extrapolación superior ha corroborado las inconsistencias detectadas en la concluyente investigación de PAYNE & BREMM (2003), causadas por las deficientes regresiones ajustadas en las celdas que tienen solo dos velocidades medidas. En definitiva, está claro que el procedimiento más ajustado para predecir el hábitat acuático emplea tres distribuciones horizontales de velocidades completas medidas en campo del siguiente modo: aplica “3-vel” para la interpolación, “1-vel” calibrado con el caudal alto en la extrapolación superior, y “1-vel” calibrado con el caudal bajo en la extrapolación inferior. Hemos estudiado las relaciones SPU-Q construidas de forma económica a partir de una sola distribución de velocidades observada, aplicando en todo el intervalo de simulación el método “1-vel” calibrado con el caudal alto (ver ej. Figura 3). Las discrepancias respecto al exigente “3-vel” han sido en la mayoría de los casos menores del 5%, lo cual confirma que la medición de perfiles de velocidades adicionales incrementa muy poco la fiabilidad de los resultados. En consecuencia, el protocolo que nosotros aconsejamos para los estudios IFIM normales de caudales ambientales optimiza el balance fiabilidad-economía: consiste en registrar una sola distribución de velocidades durante el caudal medible de forma segura más alto posible, con la cual se calibra el modelo “1-vel” para ser aplicado en todo el intervalo de simulación.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias al apoyo técnico de Thomas R. Payne (Thomas R. Payne & Associates, Arcata-California, EEUU) durante todas las fases. La Universidad de Valladolid prestó un valioso apoyo financiero.

BIBLIOGRAFÍA (por motivos de espacio presentamos solo la más relevante)

- BARTZ, B.; 1990. *Sources of uncertainty and effect on interpretation of results in the development of instream flows for fisheries habitat*. Tesis de Master. Utah State University, Logan, Utah.
- BOVEE, K. D.; 1982. *A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Instream Flow Information Paper No. 12. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-82/26. Fort Collins, Colorado.
- BOVEE, K.D.; 1997. *Data collection procedures for the physical habitat simulation system*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division, Mid-continent Ecological Science Center. Fort collins, Colorado.
- BOVEE, K.D.; LAMB, B.L.; BARTHOLOW, J.M.; STALNAKER, C.B.; TAYLOR, J. y HENRIKSEN, J.; 1998. *Stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-1998-0004, U.S.G.S.
- BOVEE, K.D. y MILHOUS, R.T.; 1978. *Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques*. Instream Flow Information Paper No. 5. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33. Fort Collins, Colorado.
- BREMM, D.J.; 1988. *Comparison of stream velocity simulations for the IFG4 model three-flow, one-flow, and no-velocity options*. Tesis de Master. Humboldt State University, Arcata, California.
- DIEZ HERNÁNDEZ, J. M.; 2003. *Análisis Comparativo de los métodos de simulación hidráulica en PHABSIM, con propuesta de nuevos métodos hidráulicos en una dimensión*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- DIEZ HERNÁNDEZ, J.M. y MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; 2004. The influence of 1D hydraulic simulation on the PHABSIM habitat index.. *Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics* (CD), 12-17/9/04, Madrid, España.
- PAYNE, T.R. & BREMM, D.J.; 2003. The influence of multiple velocity calibration sets on the PHABSIM habitat index. *Proceedings of International IFIM user's workshop* (CD), 1-5/6/03, Fort Collins, Colorado.
- TRPA (Thomas R. Payne & Associates) (2004). *Programa informático RHABSIM 3.0 en Español (Riverine Habitat Simulation Software)*. Thomas R. Payne & Associates. Arcata, California. <http://www.northcoast.com/~trpa/>.
- WADDLE, T. (Ed); 2001. *PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises*. U.S. Geological Survey. Fort Collins, Colorado.

Tabla 1. Incrementos del Error Relativo de simulación de Velocidades (IEV) y del Hábitat (IEH) generados con los tres modelos de velocidades debido a un error previo de la modelación de NSL, en tres hábitats básicos (rápidos, tablas y remansos) de tres tipos de tramos fluviales (alta-pendiente, media-p. y baja-p).

Método	IEV (%)			IEH (cm/s)		
	Rápidos	Tablas	Remansos	Rápidos	Tablas	Remansos
Tramo alta-pendiente						
3-vel	1,52	6,42	6,23	14,18	17,31	19,60
1-vel	1,75	8,03	6,75	8,36	9,32	12,92
no-vel	1,60	3,94	5,86	4,45	4,82	9,85
Tramo media-pendiente						
3-vel	1,20	4,52	3,65	13,20	15,88	18,45
1-vel	2,86	7,12	5,98	7,65	9,21	10,64
no-vel	1,82	3,02	4,75	3,95	5,01	7,15
Tramo baja-pendiente						
3-vel	0,75	0,74	0,81	12,51	14,98	17,52
1-vel	4,32	6,81	5,26	5,23	9,02	9,60
no-vel	2,75	2,72	2,68	3,01	5,01	6,01

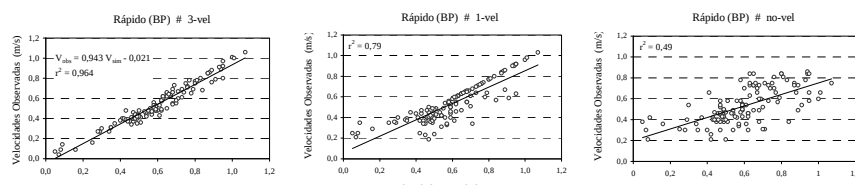


Tabla 2. Errores Relativos Medios (ERM) y Errores Absolutos Medios (EAM) de las configuraciones destacadas de los modelos de velocidades tres hábitats básicos (rápidos, tablas y remansos) de tres tipos tramos fluviales (alta-pendiente, media-pendiente y baja-pendiente). El modelo “1-vel” ha sido calibrado del modo más eficiente de forma anclada con el caudal alto.

Método	ERM (%)			EAM (cm/s)		
	Rápidos	Tablas	Remansos	Rápidos	Tablas	Remansos
Tramo alta-pendiente						
3-vel	6,95	11,32	13,65	2,60	3,42	3,51
1-vel	26,51	27,17	29,98	5,01	8,14	9,43
no-vel	42,18	45,21	50,94	9,89	10,12	14,69
Tramo media-pendiente						
3-vel	6,03	7,81	10,19	2,26	2,36	2,62
1-vel	21,71	23,15	26,48	4,10	6,94	8,33
no-vel	40,85	40,05	48,23	9,58	8,96	13,91
Tramo baja-pendiente						
3-vel	5,19	3,64	8,11	1,94	1,10	2,09
1-vel	18,47	10,21	21,08	3,49	3,06	6,63
no-vel	39,21	37,45	46,52	9,19	8,38	13,42

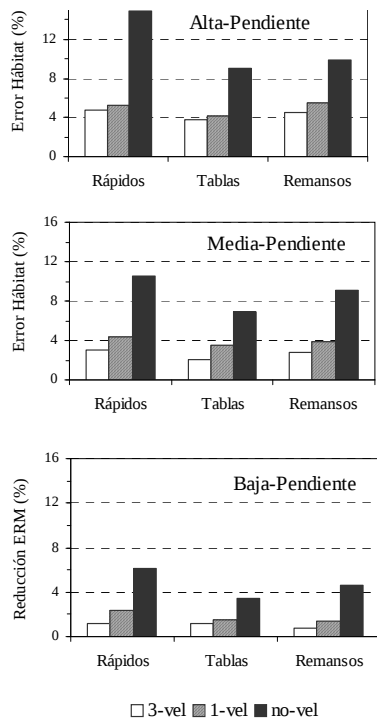


Figura 2. Error relativo promedio de simulación del hábitat (%) generado con los tres modelos de velocidades en tres hábitats básicos (rápidos, tablas y remansos) de tres tramos fluviales (alta-pendiente, media-pendiente y baja-pendiente), empleando diferente número de perfiles horizontales de velocidades.

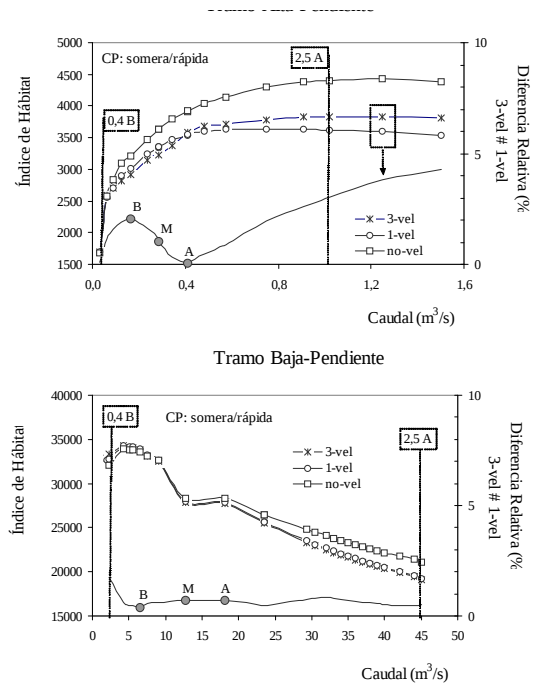


Figura 3. Simulación del Índice de Hábitat (SPU) en una tabla de los tramos de alta-pendiente y baja-pendiente con los tres modelos estándar de velocidades, dentro del rango aceptado (entre el 40% del caudal bajo y el 250% del caudal alto), para la preferencia de zonas someras/rápidas. El eje secundario muestra la diferencia relativa entre las predicciones a partir de tres perfiles de velocidades ("3-vel") y solamente con uno ("1-vel").