

La lógica difusa en la modelización y manejo de ecosistemas acuáticos

MAGDALENO MAS, FERNANDO (*) y MARTÍNEZ ROMERO, ROBERTO (**)

RESUMEN La incorporación de la lógica difusa (*fuzzy logic*) en la modelización y manejo de ecosistemas acuáticos amplía enormemente las posibilidades de valoración y análisis de estos sistemas. Hasta la fecha, la simulación de los hábitats acuáticos se había venido desarrollando por medio de modelos basados en curvas de preferencia de las principales variables hidráulicas relacionadas con la calidad de los hábitats. La lógica difusa permite introducir un mayor número de variables, al aumentar de forma significativa las posibilidades de combinación entre ellas. Además, incorpora el conocimiento y valoración de expertos. La simulación de hábitats piscícolas y la determinación de regímenes de caudales ambientales son dos de las aplicaciones fundamentales, dentro de la gestión de los recursos hídricos, en las que es posible aplicar esta herramienta. En este artículo se revisan las principales ventajas de la utilización de la lógica difusa en comparación con las técnicas clásicas, y se ofrece un ejemplo práctico de aplicación de ambos procedimientos, en un tramo del río Lozoya (Madrid). Los resultados muestran las importantes diferencias que surgen del uso de una u otra metodología, y, en especial, las notables ventajas que para la labor de los técnicos puede ofrecer el uso de los modelos basados en lógica difusa.

FUZZY LOGIC IN FRESHWATER ECOSYSTEMS MODELLING AND MANAGEMENT

ABSTRACT *Fuzzy logic inclusion in freshwater ecosystems modelling and management widely enlarges the number of analysis and assessment options in those places. Up to date, aquatic habitats simulation required preference curves-based models of the main hydraulic variables involved in habitats quality. Fuzzy logic allows the introduction of new variables, since the number of combinations can be higher, and the monitoring and knowledge of experts is also involved. Fish habitats simulation and instream flows assessment are some of the main applications of this new tool, in the field of water resources management. This paper analyses the most important advantages of fuzzy logic utilization when compared to traditional tools. Furthermore, a practical case including both options is shown, in a reach of Lozoya river (Madrid). Results make clear the differences between those two methodologies and, specially, the improvement due to fuzzy models utilization.*

Palabras clave: Lógica difusa, Lógica borrosa, *Fuzzy logic*, Simulación, Curvas de preferencia, Hábitat, Lozoya.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de lógica borrosa o difusa (*fuzzy logic*) fue creado hace ya cuatro décadas por Zadeh (1965), como una extensión de la lógica clásica o booleana, para permitir la modelización de procesos que incorporan un cierto grado de incertidumbre. El dominio de una variable se asocia de esta manera a un conjunto difuso de valores a través de una función de pertenencia, en lugar de clasificarlos directamente como verdadero/falso, bueno/malo, alto/bajo, etc., como ocurre en la lógica tradicional. De esta manera, la lógica difusa permite extraer conclusiones a partir de supuestos que representan cierta incertidumbre. Un elemento forma parte de un conjunto en un cierto grado, llamado grado de pertenencia (Lahoz-Beltrá, 2004). Cada variable que interviene como hipótesis en una regla tiene asociado un dominio. Cada dominio puede estar divi-

dido en tantos conjuntos difusos como el experto considere oportuno. Cada una de estas particiones tiene asociada una etiqueta lingüística.

Se trata por tanto de una lógica multivaluada, mediante la cual nociones como "bastante alto" o "más bien bajo" (más típicas del pensamiento humano, y más comunes en los procesos naturales) pueden adoptar una formulación matemática y ser procesadas mediante programas informáticos.

La lógica difusa es, por ello, la base de los sistemas expertos de decisión o, de forma más general, de los sistemas con base en el conocimiento. Este conocimiento viene normalmente representado por las reglas IF-THEN (premisa-consecuencia), que son las que indican en qué grado se ajusta un nivel determinado de la variable a la premisa indicada. Generalmente, los conjuntos difusos creados a partir de cada una de las reglas individuales se combinan en un solo conjunto, que pueda ser posteriormente desborrosificado o desdifusado (*defuzzied*) en un único valor real (*crisp value*) mediante diversos operadores.

En algunas ocasiones, la aserción manifestada por la cláusula IF incluye dos premisas conectadas por los operadores AND o OR. Estos operadores se definen matemáticamente por la regla MIN-MAX (Zadeh, 1965). Cuando dos o más con-

(*) Ingeniero de Montes. Área de Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

(**) Ingeniero de Montes. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

diciones se encuentran conectadas por el operador AND, la pertenencia de la premisa combinada es el valor mínimo de pertenencia de todas las condiciones. Por el contrario, cuando la premisa está compuesta de condiciones conectadas por el operador OR, se escoge el valor máximo de pertenencia de entre todas las condiciones (Cheung *et al.*, 2004).

En estos años, la lógica borrosa ha venido utilizándose fundamentalmente para el control de subsistemas y procesos industriales complejos, así como también para la electrónica de entretenimiento y hogar, sistemas de diagnóstico y otros sistemas expertos. Sólo en la segunda mitad de los años 90 se puede hablar de algunas aplicaciones interesantes creadas en el ámbito de la gestión de los recursos naturales (Reynolds, 2001). Entre ellas, cabe citar las relativas a la clasificación de imágenes captadas mediante teledetección (Blonda *et al.*, 1996), evaluación de riesgos ambientales (Holland, 1994), análisis de ecosistemas (Salski & Sperlbaum, 1991), evaluación ambiental (Smith, 1995, 1997), análisis de recursos pesqueros (Saila, 1996), modelización de cuencas hidrográficas (Anon, 1994), etc.

Por lo que respecta a la simulación y modelización de hábitats acuáticos, el procedimiento clásico se fundamenta en el estudio de variables hidráulicas básicas en la valoración de un hábitat concreto para una determinada especie piscícola, como son la velocidad media, el calado y el tipo de sustrato. Generalmente, cada una de ellas se analizaba de forma independiente, definiéndose la calidad final de un hábitat a través de la multiplicación de los resultados obtenidos para cada una de ellas, o mediante la adopción de criterios como el mínimo o la media de los valores individuales. Evidentemente, esta metodología, basada en la utilización de las llamadas curvas de preferencia, carece en muchas ocasiones de la consideración de las numerosas combinaciones posibles existentes entre los diferentes parámetros físicos que describen las características de un hábitat determinado. Asimismo, no se tiene en cuenta la conectividad espacial y la interacción entre hábitats dentro de un tramo concreto (Jorde *et al.*, 2001).

Estas carencias motivaron la utilización de nuevas metodologías, basadas en la estadística multivariada, y, finalmente, el empleo de estos nuevos modelos basados en lógica difusa, que facilitan la inclusión del consejo de expertos y de un número mucho mayor de combinaciones entre parámetros físicos.

El incremento en la regulación de los ríos y el nuevo ordenamiento normativo derivado de la aprobación de leyes más restrictivas tanto a escala nacional como europea hacen

precisa la utilización de nuevas herramientas, capaces de describir de forma más precisa las características de los hábitats acuáticos, y el tipo de gestión que requieren nuestros sistemas fluviales.

Es en este marco donde los modelos basados en lógica difusa adquieren un mayor interés, al permitir llevar a cabo una mejor modelización y gestión de los ecosistemas acuáticos. La precisión y versatilidad de los resultados obtenidos mediante el empleo de estos modelos auguran una amplia utilización de los mismos, en especial si se combinan con otras técnicas clásicas y con otras metodologías capaces de integrar un mayor número de variables características del ecosistema. Los resultados ofrecidos en este artículo permiten observar algunas de las ventajas derivadas de la utilización de la lógica difusa en la simulación de hábitats piscícolas, en un río fuertemente regulado de la cuenca del Tajo.

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio (figura 1) en la que se han llevado a cabo las mediciones corresponde a un tramo del río Lozoya, situado en el Término Municipal de Pinilla del Valle (Madrid), aguas arriba del embalse de La Pinilla, dentro del Coto de Pesca "Alameda" (coto de trucha común, trucha arco iris, y de ciprínidos). El entorno del río en este tramo está, en general, poco



FIGURA 2. Vista parcial del tramo de estudio (río Lozoya, Madrid).

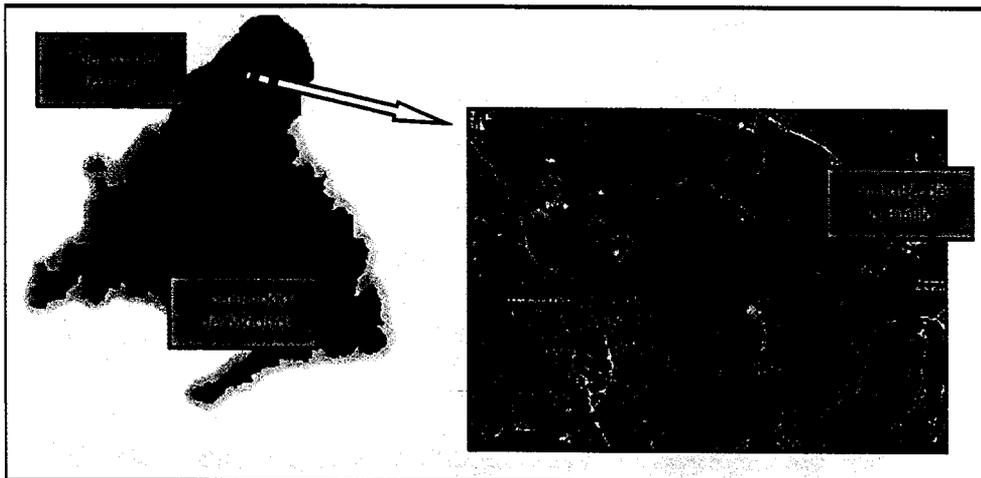


FIGURA 1. Zona de estudio, en la cuenca del río Lozoya (Madrid).

alterado y bien conservado, aunque existen algunos problemas ligados al sobrepastoreo y a un manejo inadecuado de los pastos y cultivos. El tramo conserva un bosque de ribera más o menos continuo, de dimensiones importantes, compuesto principalmente por ejemplares de sauce (*Salix salviifolia*, *Salix atrocinerea*, *Salix purpurea*, *Salix triandra*), chopo (*Populus nigra*) y fresno (*Fraxinus angustifolia*). La cuenca del Lozoya se asienta sobre materiales silíceos (gneises, granitos, pizarras, esquistos), aunque en el valle mismo del Lozoya aparecen algunos afloramientos calizos, de pequeñas dimensiones, que aportan también materiales finos con este carácter calizo. En la figura 2 se puede observar una vista parcial del tramo estudiado, donde se aprecia la estructura del bosque de ribera, y las características de algunas de las variables abióticas utilizadas en este trabajo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. RECOGIDA DE DATOS

El tramo de río estudiado queda delimitado por dos secciones transversales, una de entrada y otra de salida, con una longitud total de 120 metros, en el que se incluyen zonas de aguas rápidas y de aguas lentas.

Las mediciones realizadas consistieron en los siguientes trabajos:

- a) Elaboración detallada de la topografía del terreno: para el levantamiento topográfico se empleó una estación total topográfica *Pentax PCS 315*, junto con el prisma apropiado. El levantamiento consistió en la toma de 250 puntos a lo largo y ancho del cauce, de los que además de sus coordenadas (x,y,z), se anotó el tipo de sustrato existente en el mismo.
- b) Medición simultánea de caudales y altura de la lámina de agua en las secciones de entrada y salida del tramo: la medición de caudales y altura de lámina de agua se realizó de manera simultánea en cada una de las dos secciones que limitaban el tramo. La medición de caudales se llevó a cabo con un correntímetro *Valeport 801* y una escala, tomando 20 mediciones a lo largo de la sección transversal. El sensor del correntímetro se colocó a una profundidad de 0,6 veces el calado, por ser la profundidad con que mejor se estima la velocidad media (figura 3). La medición de la altura de lámina de agua se realizó con la misma estación total empleada para realizar la topografía, tomando la cota del nivel del agua en 10 puntos de cada sección.

3.2. APLICACION DE LA LOGICA DIFUSA.

Las reglas difusas utilizadas para llevar a cabo el trabajo se obtuvieron a partir del comportamiento conocido de algunas de las variables que intervienen en el proceso de decisión, a partir de la literatura especializada, pero también, y en gran medida, de la experiencia de los autores en este campo. Se excluyeron aquellos resultados que pudieran contradecir la evidencia empírica.

Las características físicas de entrada fueron convertidas en etiquetas lingüísticas (alto, medio, bajo, etc.), definidas por conjuntos borrosos, usando funciones trapeziales y triangulares simétricas. La elección de estas funciones se basó en la escasa experiencia existente hasta la fecha en este ámbito, razón que nos inclinó a elegir funciones sencillas y de fácil aplicación. En principio, además, se asignó a todas las reglas un mismo peso, dado que tampoco se contaba con información que indujera a primar unas por encima de otras. Todas las reglas partían, por tanto, con un mismo grado de incertidumbre (conocido en este campo como factor de confianza - CF).

Las variables utilizadas fueron:

- i. la velocidad del agua;
- ii. el calado o profundidad del agua en cada punto;
- iii. el tipo de sustrato del lecho del cauce;
- iv. el porcentaje de sombreado sobre el cauce;
- v. la turbidez de las aguas.

De las tres primeras, se contaba con curvas de preferencia para la trucha adulta, mientras que de las dos últimas se utilizó el conocimiento previo existente en esta materia, a partir de otras fuentes:

- La velocidad es una de las variables hidráulicas con mayor influencia en la calidad de los hábitats fluviales, dada su proporcionalidad directa con el caudal que fluye por el río. El rango de velocidades que necesita cada especie piscícola en cada una de sus etapas de desarrollo empieza a estar ya bastante bien definida para las principales especies de nuestros ríos y embalses. En especial, la trucha común ha sido posiblemente la especie más estudiada, y para la que existe un mayor volumen de información en este ámbito. La velocidad fue medida en metros por segundo.
- El calado o profundidad del agua es, asimismo, una variable de gran importancia. Su influencia sobre la cantidad y calidad de los hábitats en un tramo determinado es muy elevada, especialmente para una especie como la trucha común. El calado fue medido en metros.
- El tipo de sustrato del lecho del río es la tercera variable de la que se han estudiado por lo general las curvas de preferencia para la ictiofauna. El tipo de sustrato ha sido definido en este trabajo mediante un código de 8 valores, a partir de la clasificación de tamaños de la *American Geophysical Union*, posiblemente la más utilizada en estudios y proyectos relacionados con el medio fluvial (tabla 1).
- El sombreado sobre el cauce guarda una gran relación con la temperatura de las aguas del río, de la cual depende de forma directa la capacidad de albergar especies exigentes como la trucha común. El sombreado se midió en tanto por uno. Se consideró que un sombreado netamente bajo (pertenencia = 1) correspondía a porcentajes < 20% (0,2), y que un sombreado netamente alto (pertenencia = 1) era como mínimo de un 80% (0,8).

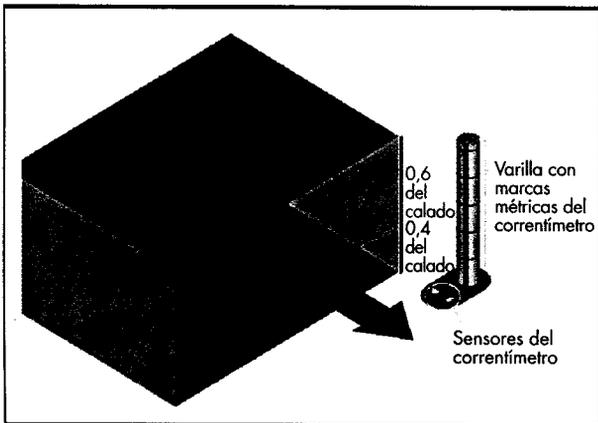


FIGURA 3. Medición de velocidad media estimada mediante correntímetro.

Tipo de sustrato	Tamaño	Código
arcilla	< 0,062 mm	0
limo	0,004 - 0,062 mm	1
arena	0,062 - 2 mm	2
gravillas	2 - 8 mm	3
gravas	8 - 64 mm	4
cantos rodados	64 - 256 mm	5
bolos	256 - 1024 mm	6
grandes bloques	>1024 mm	7
roca madre	lecho de roca continua	8

TABLA 1. Tipos de sustratos del lecho del río (adaptado de la clasificación de la American Geophysical Union).

- Finalmente, la turbidez fue elegida por su relación con el oxígeno disuelto en el agua. Para esta variable se tomaron como unidades de medida las unidades nefelométricas de turbidez (NTU). La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión, y es considerada una buena medida de la calidad del agua. Esta variable se encuentra además muy relacionada con el contenido de oxígeno en el agua, ya que

las partículas suspendidas absorben calor de la luz del sol, haciendo que las aguas turbias se vuelvan más calientes y reduciendo así la concentración de oxígeno. Por otra parte, las partículas en suspensión dispersan la luz, reduciendo la actividad fotosintética en plantas y algas, lo cual contribuye a reducir aún más dicha concentración. La turbidez se mide generalmente mediante turbidímetros, aunque en lagos y embalses se suele utilizar el conocido como disco de Secchi. Se considera, por lo general, que las aguas se pueden considerar muy poco turbias hasta las 5 NTU, valor que corresponde además con el máximo de turbidez para el agua de consumo humano, aunque idealmente deberían estar por debajo de 1 NTU. Tradicionalmente, la literatura reconoce las 30 NTU como el umbral admisible de turbidez para distintas especies de salmónidos. Sin embargo, otros estudios han comprobados que este valor podría elevarse según las condiciones hasta las 50 NTU, ya que es preciso considerar además los beneficios ocasionales de un aumento en la turbidez, desde el punto de vista de la defensa de los peces frente a ciertos predadores acuáticos y terrestres, e incluso por el aumento de biomasa de presas para estas especies. Se decidió por ello tomar como valor medio las 40 NTU, ante la falta de información directa sobre el comportamiento de esta variable en el tramo estudiado. En cuanto a los valores superiores, valores de 100 NTU se pueden considerar ya bastante altos, aunque resulta difícil establecer umbrales definitivos, dada la controversia existente a este respecto en los diversos trabajos consultados (Bash *et al.*, 2001; Harvey & Railsback, 2004; Madej, 2004).

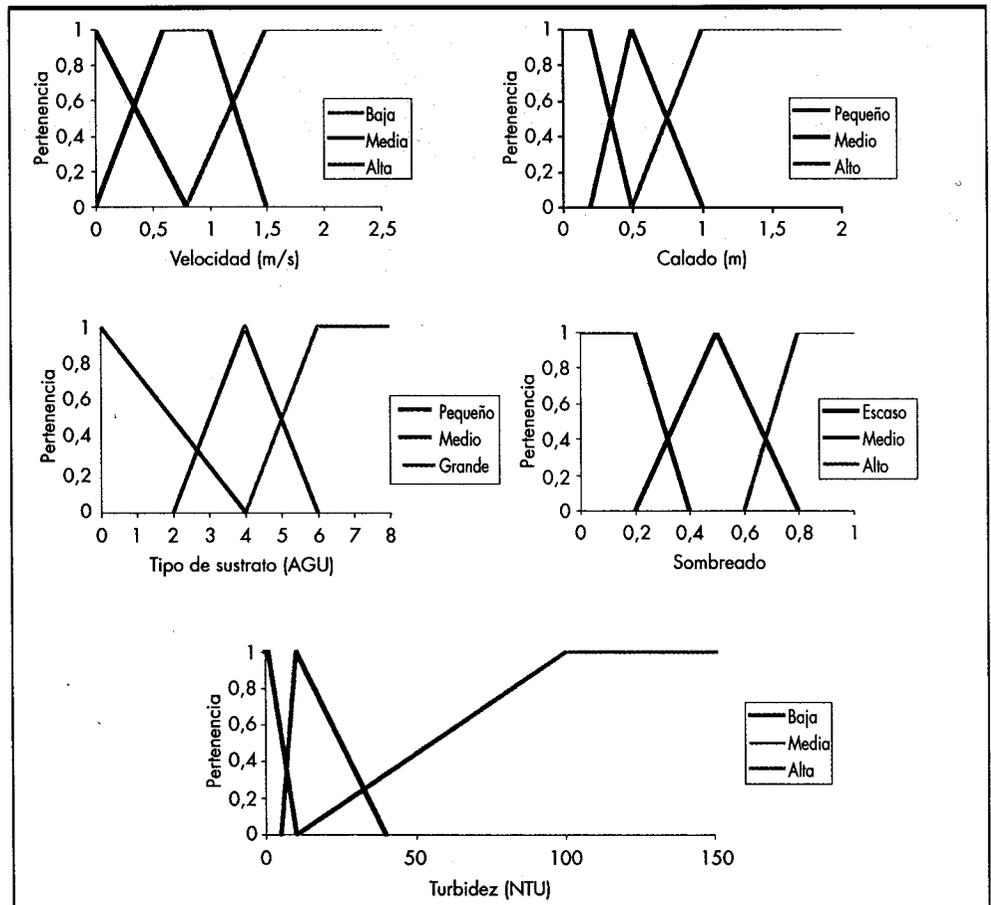


FIGURA 4. Conjuntos difusos que definen la forma de las funciones de pertenencia para las variables velocidad, calado, tipo de sustrato, sombreado y turbidez, en el tramo analizado.

Tipo de sustrato	Velocidad	Calado	Sombreado	Turbidez	Idoneidad
Pequeño	Baja	Medio	Medio	Baja	Media
Pequeño	Baja	Medio	Medio	Media	Baja
Pequeño	Baja	Medio	Medio	Alta	Baja
Pequeño	Baja	Medio	Alto	Baja	Alta
Pequeño	Baja	Alto	Medio	Baja	Media
Pequeño	Baja	Alto	Medio	Media	Baja
Pequeño	Baja	Alto	Medio	Alta	Baja

TABLA 2. Extracto del conjunto de las 243 reglas difusas utilizadas en la simulación del hábitat para ejemplares adultos de trucha común (*Salmo trutta m. fario*) en el tramo seleccionado.

El número de puntos en que se llevó a cabo la batimetría del río fue de 250, como se ha indicado al comienzo de este artículo. Sin embargo, y con objeto de hacer más preciso el análisis de la idoneidad de los hábitats para la especie indicada, se llevó a cabo una interpolación sobre los mismos, obteniéndose finalmente un número cercano a los 4.800 nodos.

Los parámetros utilizados en la combinación de criterios se clasificaron, como se expuso con anterioridad, en los conocidos como conjuntos difusos (figura 4). Estos conjuntos permitieron, una vez reunida toda la información en torno a la relación de las distintas variables elegidas con la idoneidad de los hábitats fluviales, proceder a su transformación en las reglas antes comentadas, que reciben también el nombre de reglas heurísticas (tabla 2). Para ello, se completó una tabla de 243 filas en las que se dispusieron todas las combinaciones posibles entre las etiquetas lingüísticas de las distintas variables usadas en el estudio. Una vez expuestas todas las combinaciones posibles, se procedió a determinar el resultado en la columna correspondiente a la idoneidad de hábitat, para lo cual se utilizaron cuatro categorías o etiquetas lingüísticas: baja, media, alta y muy

alta. Todas las reglas tienen la forma IF-THEN, y el operador empleado entre las distintas variables es AND, por lo que se decidió utilizar la regla MIN-MAX de la que se habló en el primer capítulo (Introducción). De esta forma, se consigue contar con una formulación difusa de reglas de gran parecido con el mecanismo de pensamiento humano, que permiten explicar la relación entre las variables de entrada o explicativas y la variable consecuencia, en nuestro caso la idoneidad del hábitat.

Para obtener el valor de pertenencia al conjunto difuso de la variable de salida final (figura 5), se procedió a combinar la conclusión obtenida a partir de cada regla heurística utilizada. Esta combinación se llevó a cabo a través del método de acumulación de conocimiento de Buchanan & Shortliffe (1984). Este método se formula, de forma general, según la siguiente expresión:

$$Pertenencia_j = Pertenencia_{(j-1)} + Pertenencia_k \cdot (1 - Pertenencia_{(j-1)})$$

donde $Pertenencia_j$ es el valor de pertenencia de conclusión tras la acumulación de los valores de pertenencia de j conjuntos de reglas, y $Pertenencia_k$ es el valor de pertenencia de la

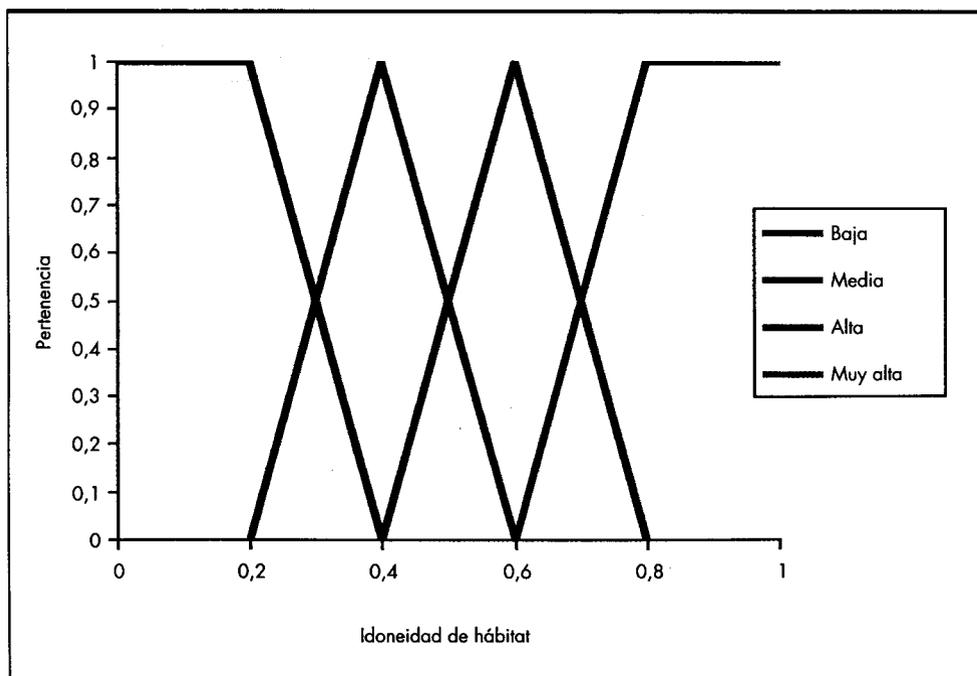


FIGURA 5. Conjuntos difusos de salida para la idoneidad del hábitat en el tramo estudiado. Los valores de idoneidad baja y muy alta vienen definidos por funciones trapeziales, mientras que los valores medios y altos están definidos por funciones triangulares simétricas. La idoneidad del hábitat varía entre 0 (mínima) y 1 (máxima).

Nodo	AltoMin. (sup. = 0,6)	MedioMin. (sup. = 0,4)	MuyAltoMin. (sup. = 0,9)	SI
14	0,749	0,500	0,000	0,52
15	0,839	0,277	0,000	0,55
16	0,802	0,097	0,000	0,58
17	0,784	0,000	0,000	0,60
19	0,785	0,000	0,000	0,60
24	0,583	0,500	0,000	0,51
25	0,511	0,044	0,000	0,58
26	0,505	0,018	0,000	0,59
27	0,504	0,500	0,000	0,50
28	0,837	0,258	0,000	0,55

TABLA 3. Ejemplos de la desdifusificación (defuzzification) llevada a cabo en todos los nodos del tramo para obtener los mapas finales de idoneidad de hábitat. Más oscuro, el ejemplo expuesto para el nodo nº 15.

regla k. De esta manera, fue posible obtener un solo valor para cada etiqueta lingüística.

Finalmente, como se expuso con anterioridad, es preciso realizar el proceso inverso al llevado a cabo hasta este momento, con el fin de obtener un único valor de salida a partir del conjunto de valores obtenidos en las distintas etiquetas lingüísticas. Este proceso suele denominarse desdifusificación o desborrosificación (*defuzzification*), y se efectúa a través de distintos métodos, más o menos complicados. Posiblemente el método más utilizado por su sencillez, y por los buenos resultados que proporciona, es el método del centroide (Cox, 1999). El método del centroide calcula el valor final de salida (en este caso la idoneidad del hábitat) como la media de los valores supremos de cada una de las funciones difusas de pertenencia finalmente elegidas, ponderadas mediante el valor de pertenencia asociado a cada conclusión obtenida. En las funciones triangulares, el valor supremo es equivalente al valor máximo de idoneidad de hábitat con mayor grado de pertenencia. En el caso de las funciones trapeziales, el valor supremo es obtenido como el punto medio entre los dos extremos de la meseta de la función. Dicho de otra forma, la idoneidad de hábitat se obtendría como:

$$Idoneidad\ de\ hábitat = \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=n} Pertenencia_j \cdot Sup_j \right)}{\sum_{j=1}^{j=n} Pertenencia_j}$$

donde Sup_j es el supremo de las conclusiones de las funciones de pertenencia j . En la tabla 3 se ofrece un ejemplo de aplicación de este operador. Así, para el nodo nº 15, la idoneidad del hábitat tomaría un valor de $(0,6 \cdot 0,839 + 0,4 \cdot 0,277 + 0,9 \cdot 0,000) / (0,839 + 0,277 + 0,000)$, que es igual a 0,55. Este es el valor que tomará el parámetro idoneidad de hábitat en el mapa final de salida.

4. RESULTADOS

El número de combinaciones de variables elegidas entre todas las posibles o, dicho de otra forma, las combinaciones de va-

riables que realmente se presentaban sobre el terreno, una vez realizada la fase de trabajo en campo, fue un total de 24. De ellas, la mitad correspondían a un valor *Alto* de idoneidad, 7 correspondían a un valor *Muy Alto*, y las 5 restantes a un valor *Medio*, como se puede observar en la tabla 4. Los 4.800 nodos utilizados para llevar a cabo la simulación habían de pertenecer por tanto a una de estas categorías, hecho éste que se plasma en el mapa de idoneidad sobre lógica difusa.

En esta tabla 4 se aprecia que en todas las combinaciones existentes, la variable turbidez se movía siempre en valores bajos, y que la variable calado fue la que tomaba un mayor número de valores (pequeño, medio, alto). Este rango de valores es fácilmente identificable con un tramo alto de río, como es, efectivamente, el analizado en este estudio, aún con todas las salvedades que exige el análisis de la relación entre estas premisas.

En la tabla 5 se ofrece un extracto del registro de información acumulada, y del proceso de cálculo de los valores de pertenencia para cada una de las variables, así como de los valores mínimos que se fueron obteniendo para cada uno de los nodos. Como se puede observar en dicha tabla, la información utilizada en cada nodo para cada una de las variables era muy precisa. Posteriormente, se procedió a realizar el método de acumulación expuesto en el apartado anterior, y la desdifusificación final, tras la cual se obtuvieron los valores finales de idoneidad de hábitat de todos los nodos del tramo estudiado.

En la figura 6 ((1) y (2)) aparecen representados los dos mapas finales de Idoneidad de hábitat, el primero de ellos obtenido a partir del método tradicional de curvas de preferencia, y el segundo mediante las funciones de pertenencia de la lógica difusa, para un caudal estimado de 2 m³/s. La flecha indica en ambos casos el sentido de la corriente, y el código de colores utilizado viene acompañado por una leyenda que indica la correspondencia con el intervalo de valores de idoneidad. En el primer caso, los valores fueron distribuidos en 8 categorías, mientras que en el segundo, dada la mayor heterogeneidad de los resultados, se decidió trabajar con 10 categorías de valores.

En una fase posterior, los mapas de calidad de hábitat obtenidos podrían dar lugar a la obtención de diagramas del área potencial útil (APU). Estos mapas proporcionarían información del valor de la superficie potencialmente utilizable por las truchas adultas en una sección, frente a diversos niveles de caudal. Sin embargo, la obtención de estas relaciones empíricas re-

Tipo de sustrato	Velocidad	Calado	Sombreado	Turbidez	Idoneidad	Código
Alto	Baja	Pequeño	Alto	Baja	Alta	a1
Alto	Baja	Alto	Escaso	Baja	Alta	a2
Medio	Baja	Pequeño	Alto	Baja	Alta	a3
Medio	Baja	Medio	Escaso	Baja	Alta	a4
Medio	Baja	Alto	Escaso	Baja	Alta	a5
Alto	Baja	Pequeño	Escaso	Baja	Media	m1
Alto	Baja	Medio	Escaso	Baja	Media	m2
Medio	Baja	Pequeño	Escaso	Baja	Media	m3
Alto	Baja	Medio	Alto	Baja	Muy alta	ma1
Alto	Baja	Alto	Alto	Baja	Muy alta	ma2
Medio	Baja	Medio	Alto	Baja	Muy alta	ma3
Medio	Baja	Alto	Alto	Baja	Muy alta	ma4
Alto	Media	Pequeño	Alto	Baja	Alta	a6
Alto	Media	Alto	Escaso	Baja	Alta	a7
Medio	Media	Pequeño	Alto	Baja	Alta	a8
Medio	Media	Medio	Escaso	Baja	Alta	a9
Medio	Media	Alto	Escaso	Baja	Alta	a10
Alto	Media	Pequeño	Escaso	Baja	Media	m4
Alto	Media	Medio	Escaso	Baja	Alta	a11
Medio	Media	Pequeño	Escaso	Baja	Media	m5
Alto	Media	Medio	Alto	Baja	Muy alta	ma5
Alto	Media	Alto	Alto	Baja	Alta	a12
Medio	Media	Medio	Alto	Baja	Muy alta	ma6
Medio	Media	Alto	Alto	Baja	Muy alta	ma7

TABLA 4. Registro de combinaciones de variables finalmente utilizadas en el estudio.

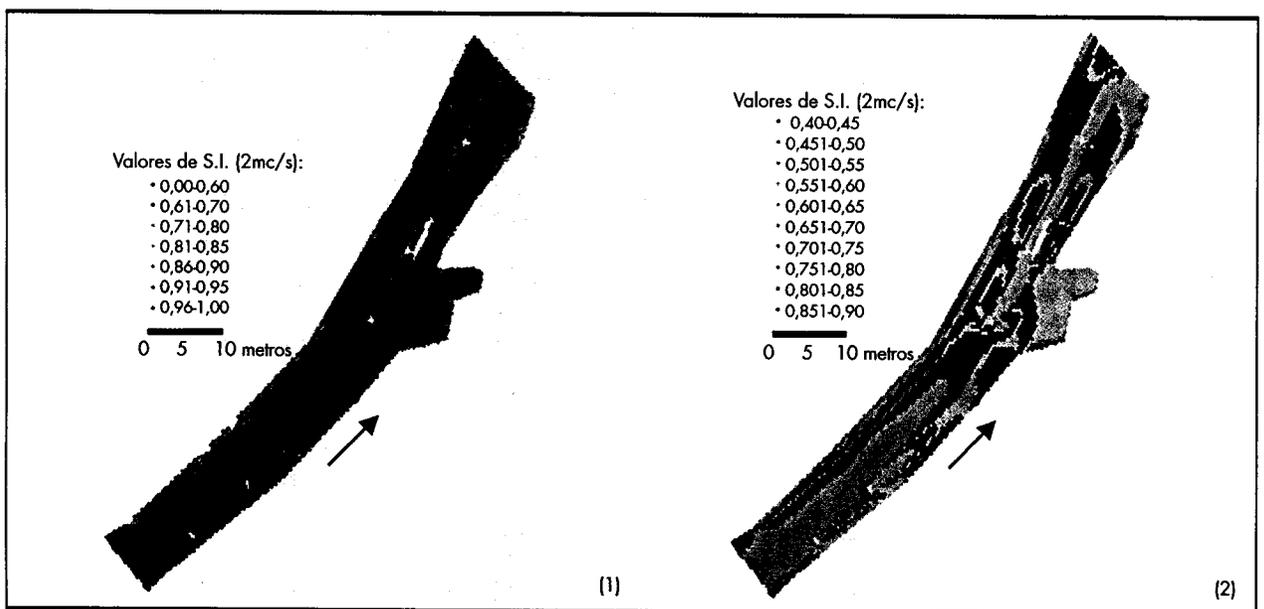


FIGURA 6. Mapa de idoneidad de hábitat para la trucha común (*Salmo trutta m. fario*) adulta en el río Lozoya (Madrid), a partir de curvas de preferencia clásicas (1) y funciones de pertenencia asociadas a procesos de lógica difusa (2).

Nodo	x	y	z	Rug.	Calado (m)	Vel. (m/s)	Q (m ³ /s)	Sustrato	Turbidez (NTU)	Somb.	Pert sust.	Pert vel.	Pert calado	Pert somb.	Pert turb.	Mínimo Pert.
1950	1040,282	-1247,763	1001,110	0,103	0,602	0,046	0,082	5,000	2,000	0,190	0,500	0,943	0,203	1,000	0,841	0,203
286	1058,821	-1237,288	1001,110	0,262	0,602	0,029	0,058	5,000	2,000	0,190	0,500	0,964	0,203	1,000	0,841	0,203
322	1058,612	-1237,488	1001,110	0,248	0,602	0,034	0,061	5,000	2,000	0,190	0,500	0,958	0,203	1,000	0,841	0,203
2598	1035,888	-1255,472	1001,110	0,152	0,602	0,035	0,062	5,000	2,000	0,190	0,500	0,956	0,204	1,000	0,841	0,204
2826	1033,871	-1259,709	1001,110	0,183	0,602	0,036	0,065	5,000	2,000	0,190	0,500	0,955	0,205	1,000	0,841	0,205
2684	1035,117	-1256,782	1001,110	0,161	0,602	0,031	0,058	5,000	2,000	0,190	0,500	0,961	0,205	1,000	0,841	0,205
422	1057,879	-1238,123	1001,100	0,195	0,611	0,048	0,072	5,000	2,000	0,190	0,500	0,939	0,222	1,000	0,841	0,222
288	1059,021	-1237,022	1001,100	0,274	0,612	0,015	0,058	5,000	2,000	0,190	0,500	0,981	0,223	1,000	0,841	0,223
2442	1037,401	-1253,786	1001,100	0,128	0,612	0,048	0,080	5,000	2,000	0,190	0,500	0,940	0,224	1,000	0,841	0,224
2988	1032,482	-1262,715	1001,100	0,186	0,612	0,051	0,079	5,000	2,000	0,190	0,500	0,936	0,224	1,000	0,841	0,224
2961	1032,740	-1262,278	1001,100	0,188	0,612	0,049	0,078	5,000	2,000	0,190	0,500	0,939	0,225	1,000	0,841	0,225
2627	1035,631	-1255,908	1001,100	0,152	0,612	0,034	0,061	5,000	2,000	0,190	0,500	0,958	0,225	1,000	0,841	0,225
2655	1035,375	-1256,343	1001,100	0,154	0,612	0,033	0,059	5,000	2,000	0,190	0,500	0,959	0,225	1,000	0,841	0,225
2798	1034,128	-1259,279	1001,100	0,176	0,612	0,037	0,066	5,000	2,000	0,190	0,500	0,954	0,225	1,000	0,841	0,225
4458	1014,861	-1282,084	1001,100	0,107	0,614	0,111	0,089	5,000	2,000	0,170	0,500	0,862	0,228	1,000	0,841	0,228
43	1060,483	-1232,080	1001,090	0,152	0,621	0,019	0,084	5,000	2,000	0,190	0,500	0,976	0,242	1,000	0,841	0,242
156	1059,988	-1234,661	1001,090	0,140	0,621	0,027	0,061	5,000	2,000	0,190	0,500	0,967	0,243	1,000	0,841	0,243
1990	1040,417	-1248,136	1001,090	0,083	0,621	0,047	0,093	5,000	2,000	0,190	0,500	0,941	0,243	1,000	0,841	0,243
3254	1030,270	-1267,447	1001,090	0,188	0,622	0,110	0,113	5,000	2,000	0,170	0,500	0,862	0,243	1,000	0,841	0,243
2475	1037,139	-1254,181	1001,090	0,134	0,622	0,047	0,080	5,000	2,000	0,190	0,500	0,942	0,244	1,000	0,841	0,244
2935	1033,036	-1261,854	1001,090	0,186	0,622	0,048	0,079	5,000	2,000	0,190	0,500	0,940	0,245	1,000	0,841	0,245
1401	1053,277	-1257,294	1001,090	0,171	0,623	0,015	-0,012	5,000	2,000	0,190	0,500	0,981	0,246	1,000	0,841	0,246
14	1060,934	-1231,259	1001,080	0,116	0,631	0,024	0,074	5,000	2,000	0,190	0,500	0,970	0,262	1,000	0,841	0,262
222	1059,193	-1235,072	1001,080	0,137	0,631	0,045	0,088	5,000	2,000	0,190	0,500	0,944	0,262	1,000	0,841	0,262
3280	1030,012	-1267,873	1001,080	0,179	0,632	0,112	0,115	5,000	2,000	0,170	0,500	0,860	0,264	1,000	0,841	0,264

TABLA 5. Extracto de 25 nodos de la base de conocimiento utilizada para obtener los valores de pertenencia de cada una de las variables utilizadas, junto al valor mínimo de todos ellos, elegido como valor de combinación. El número total de nodos utilizados fue de unos 4.800.

quiere un volumen de información sobre el terreno del que aún no se dispone en este trabajo, pero del que se espera disponer en pocos meses, con la intención de completar esta publicación. En esta nueva línea de trabajo se pretende asimismo incorporar información de tipo temporal, de forma que mediante la integración de los hidrogramas del río en el modelo se puedan conocer datos relacionados con la ocupación estacional del tramo, como por ejemplo los periodos de freza de la especie en esta zona o las preferencias alimenticias de la misma.

Los mapas finales de idoneidad de hábitat, obtenidos a través de los dos métodos descritos en este artículo, fueron construidos en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS™ (Esri®). Las facilidades que este SIG ofrece para la gestión de tablas y la creación de mapas de salida aconsejaron en este caso su utilización, si bien durante la ejecución de los trabajos y la redacción del artículo se sopesó la conveniencia y oportunidad de utilizar otros dos programas que proporcionan grandes posibilidades en el análisis de estas variables. Se

trata, además, de dos programas de distribución libre y de gran potencia y robustez, muy accesibles por tanto para los investigadores interesados en incorporar estos análisis a sus trabajos. El primero de ellos es el modelo bidimensional River2D (Steffler & Blackburn, 2002), utilizado para el análisis de la hidrodinámica de los ríos y la caracterización de los hábitats fluviales en dos dimensiones. Se llegaron a realizar algunos ejemplos durante el diseño de este trabajo, que demostraron sus amplias y flexibles posibilidades. El segundo es el Sistema de Apoyo a la Decisión EMDS (*Environmental Management Decision Support*) (Reynolds, 2001). Se trata de un Sistema experto basado en lógica difusa que puede convertirse, junto a otros sistemas parecidos, en un apoyo insustituible en este tipo de trabajos, por su capacidad para asociar los análisis basados en reglas de pertenencia con sistemas capaces de representar el comportamiento de estos medios acuáticos. Estos dos programas son, por tanto, ampliamente recomendables para futuros trabajos en este ámbito.

5. DISCUSIÓN

En la figura 5 se puede observar *de visu* las notables diferencias existentes entre la simulación de la idoneidad de hábitats, realizada en el primer caso con el único apoyo de las curvas de preferencias clásicas, y en el segundo, de las funciones de pertenencia asociadas a la lógica difusa. La lógica difusa permite introducir con gran facilidad un mayor número de variables, y contar así con un mayor número de combinaciones. En este caso, a las variables básicas velocidad, profundidad y sustrato se han añadido otras dos variables de gran importancia en el comportamiento de las poblaciones piscícolas, como son el

sombreado sobre el cauce y la turbidez de las aguas. Es especialmente interesante observar las diferencias existentes en el área de influencia del sombreado, que modifican totalmente las condiciones en el perímetro más cercano a las orillas. Se puede observar además que se alcanza un grado de precisión mucho más elevado, y que la distribución de la variable idoneidad es más ajustada a las heterogéneas condiciones del medio fluvial, en el que la presencia de remolinos, de zonas de acumulación de materiales gruesos o finos, o los cambios bruscos en la disposición de las líneas de corriente, hacen variar enormemente las características de los hábitats piscícolas.

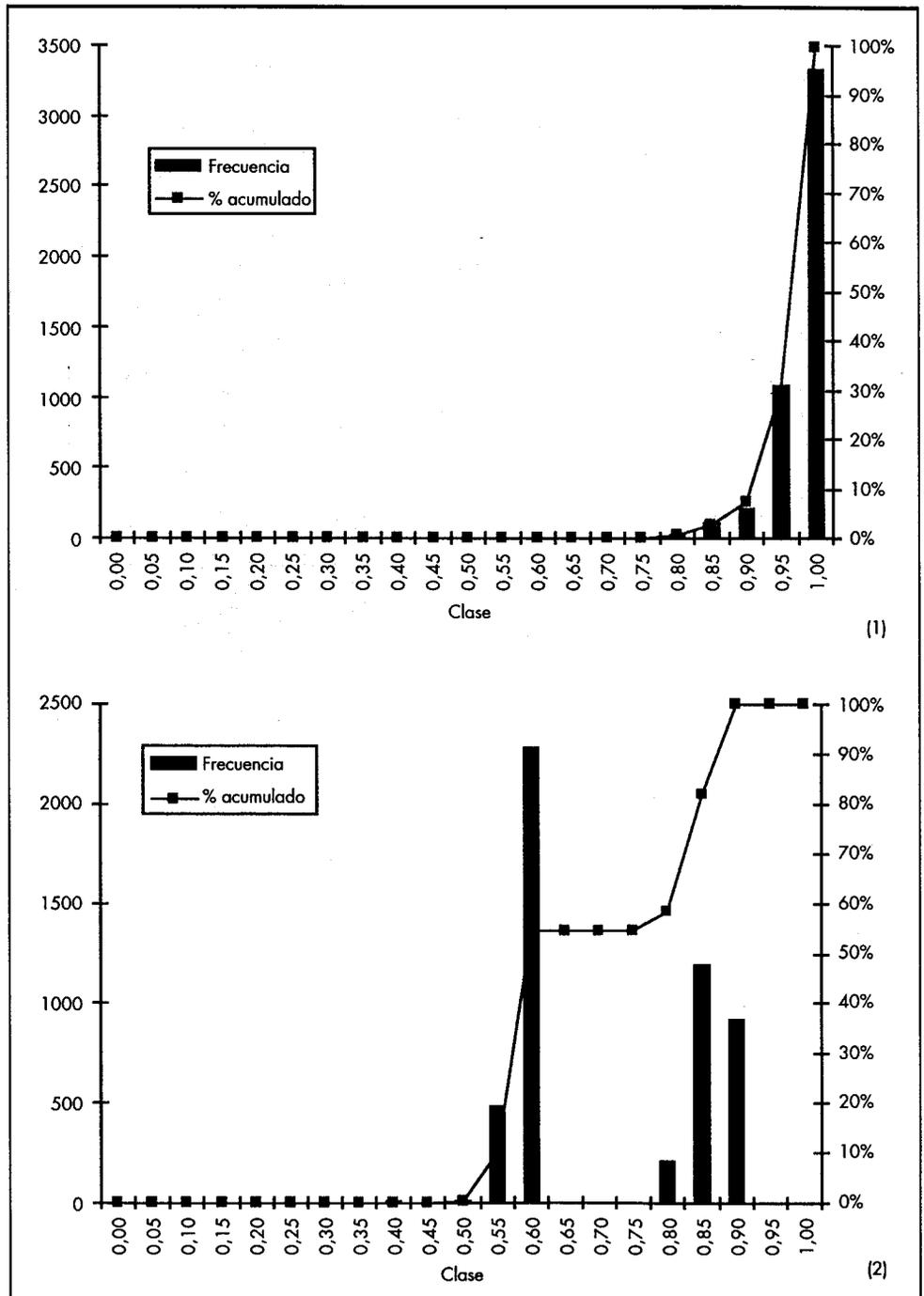


FIGURA 7. Histogramas de frecuencia y acumulaciones de las distribuciones de valores de idoneidad de hábitats obtenidos a partir de las curvas de preferencia (1) y de las funciones de pertenencia en lógica difusa (2).

	Curvas de preferencia tradicionales	Funciones de pertenencia-lógica difusa
Media	0,96	0,70
Error típico	0,0008	0,0019
Mediana	0,96	0,60
Moda	1,00	0,60
Desviación estándar	0,055	0,137
Varianza de la muestra	0,003	0,019
Coefficiente de asimetría	-6,77	0,21
Coefficiente de Curtosis	121,17	-1,63
Rango	1,00	0,50
Mínimo	0,00	0,40
Máximo	1,00	0,90
Suma	4602,32	3595,97
Nivel de confianza (95%)	0,0016	0,0037

TABLA 6. Principales estadísticos de la distribución de valores de la variable idoneidad de hábitats, a partir de los dos métodos utilizados.

Con el fin de facilitar el análisis de estos resultados, se ofrece en la tabla 6 algunos estadísticos de la distribución de valores de la variable idoneidad del hábitat. Estos datos corroboran las primeras impresiones que se desprenden de los mapas de idoneidad, ya que se puede observar que, para la distribución obtenida mediante las curvas de preferencia tradicionales, la media alcanza un valor de 0,963, muy próximo a 1, que es a su vez el valor moda. Es decir, que por este método, el tramo analizado tendría una preferencia máxima en casi toda su extensión. Además, se observa una escasa dispersión de los resultados, con una desviación típica ligeramente superior a 0,05.

Por el contrario, la distribución obtenida mediante lógica difusa muestra, debido a la introducción de las nuevas variables, y a la posibilidad de contar con un mayor número de combinaciones, con una variabilidad de resultados notablemente mayor. El valor medio baja, con relación al método anterior, a un valor próximo a 0,71, con una moda de 0,60, lo cual indica que se trata de un buen hábitat para la especie objetivo, pero con zonas de mayor preferencia, sobre todo como consecuencia de la introducción de la variable sombreado. La desviación de los resultados es, por tanto, bastante mayor al caso anterior, alcanzando la desviación típica un valor superior a 0,13, más de dos veces el valor obtenido para el primer método.

Los coeficientes de asimetría y Curtosis corroboran asimismo estas aseveraciones, ya que muestran que la distribución obtenida mediante curvas de preferencia tiene una importante asimetría negativa, con una alta concentración de valores en torno a los valores centrales, mientras que la distribución obtenida mediante lógica difusa presenta una notable simetría, y una concentración mucho menos importante en torno a los valores centrales.

En la figura 7 aparecen, además, los dos histogramas de frecuencias y acumulaciones de las distribuciones de valores de idoneidad de hábitat, en los que se puede comprobar cuál es el aspecto y las características de las mismas.

6. CONCLUSIONES

A la vista de la investigación realizada y de los resultados obtenidos, es posible establecer las siguientes conclusiones:

1. La aplicación de la lógica difusa se convierte ya en una herramienta del máximo interés para los técnicos encargados de la gestión de los ecosistemas acuáticos. El uso de esta técnica no está limitado al ámbito industrial, como ha venido ocurriendo en las últimas décadas, sino que tiene también un gran potencial en la gestión del medio natural. El alto número de variables que intervienen en todos los procesos naturales hace especialmente importante la utilización de esta herramienta, dadas las grandes posibilidades que ofrece, y la sencillez de los conceptos sobre los que se asienta.
2. El análisis de los ecosistemas acuáticos se ha venido realizando, con el paso del tiempo, a través de metodologías que integraban paulatinamente un mayor número de variables, y de combinaciones entre ellas. Este esfuerzo de mejora de la modelización ha desembocado finalmente en la existencia de un conjunto de técnicas que, dentro del campo de la Inteligencia Artificial (AI), permiten realizar análisis enormemente detallados del comportamiento de los sistemas naturales en general, y, en particular, de los sistemas acuáticos.
3. Los resultados obtenidos en este trabajo dejan claro que el nivel de precisión de los estudios realizados con lógica difusa supera, de forma muy acusada, al alcanzado mediante las metodologías tradicionales. Lo hace incluso con respecto a técnicas como las curvas de preferencia, que han sido y son una de las líneas de trabajo más importantes para grupos de investigación de todo el mundo. La lógica difusa hace uso del conocimiento obtenido mediante el estudio de estas curvas, y lo incorpora a procesos de decisión que mejoran ampliamente el resultado final de los trabajos.
4. El alto número de combinaciones utilizadas en los análisis requiere un esfuerzo de máximo rigor en las etapas de decisión y control, para evitar la introducción de ambigüedades que pudieran reducir la verosimilitud de los resultados. Esta exigencia alienta al mismo tiempo la creación y utilización de nuevos programas informáticos que sean capaces de dar apoyo al técnico encargado de estas tareas y que faciliten el desarrollo de estas técnicas y su fácil integración con otras que están evolucionando de forma rápida y paralela. En este trabajo, se ha hecho un esfuerzo de minimización de las posibles incertidumbres que pueden incorporarse durante el proceso, a pesar del gran volumen de información utilizado, por lo que los resultados obtenidos se consideran muy ajustados a las posibilidades de unas y otras técnicas.
5. Este artículo pretende no solo mejorar la simulación de los hábitats en el tramo o río estudiado, o realizar una simple comparación de métodos, sino también acercar a los gestores y técnicos de los recursos hídricos al nuevo escenario existente en esta disciplina, ante la llegada de nuevas herramientas y aplicaciones. El aumento del conocimiento sobre estos ecosistemas debe ir acompañado de un gran esfuerzo de actualización de los contenidos y de las técnicas utilizadas en los proyectos y estudios. Sólo de esta forma podrán convertirse en parte del trabajo cotidiano, y abrir el camino a la llegada de nuevas herramientas, y, especialmente, de una gestión más flexible y ajustada a la realidad de los sistemas analizados.

7. REFERENCIAS

- Anon. 1994. Fuzzy logic applied to catchment modelling. *Water and Wastewater International* 9: 40-46.
- Bash, J., Berman, C., Bolton, S. 2001. *Effects of turbidity and suspended solids on salmonids*. Center for streamside studies. University of Washington. [Online]: <http://depts.washington.edu/cwvs/Outreach/Publications/Salmon%20and%20Turbidity.pdf>.
- Blonda, P., Bennardo, A., Satalino, G., Pasquariello, G. 1996. Fuzzy logic and neural techniques integration: an application to remotely sensed data. *Pattern Recog. Letters* 17: 1343-1347.
- Buchanan, B.G. & Shortliffe, E.H. 1984. *Rule-based Expert Systems - the MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*. Addison-Wesely, California, USA.
- Cox, E. 1999. *The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. AP Professional, San Diego, California, USA.
- Cheung, W.W.L., Pitcher, T.J., Pauly, D. 2004. A fuzzy logic expert system for estimating the intrinsic extinction vulnerabilities of seamount fishes to fishing. In: Morato, T. & Pauly, D. (eds.): *Seamounts: Biodiversity and Fisheries*, pp.33-50. [Online]: http://www.seaaroundus.org/report/seamounts/09_WCheung_etal/WC_etal_TEXT.pdf.
- Harvey, B.C. & Railsback, S.F. 2004. *Elevated turbidity reduces abundance and biomass of stream trout in an individual-based model*. [Online]: <http://www.humboldt.edu/~ecomodel/documents/harvey.cjfas.03a.pdf>.
- Holland, J.M. 1994. Using fuzzy logic to evaluate environmental threats. *Sensors* 11: 57-62.
- Jorde, K., Schneider, M., Peter, A., Zoellner, F. 2001. Fuzzy based Models for the Evaluation of Fish Habitat Quality and Instream Flow Assessment. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*. Tempe, Arizona. [Online]: www.sjeweb.de/pdf/jorde2001.pdf.
- Lahoz-Beltrá, R. 2004. *Bioinformática. Simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Ed. Díaz de Santos. Madrid.
- Madej, A.L. 2004. *How Suspended Organic Sediment Affects Turbidity and Fish Feeding Behavior*. Sound Waves Monthly Newsletter. USDA. [Online]: <http://soundwaves.usgs.gov/2004/11/research2.html>.
- Reynolds, K.M. 2001. *Fuzzy Logic Knowledge Bases in Integrated Landscape Assessment: Examples and Possibilities*. United States Department of Agriculture. Forest Service. General Technical Report PNW-GTR-521.
- Salski, A. & Sperlbaum, C. 1991. Fuzzy logic approach to modeling in ecosystem research. *Lecture Notes in Computer Science* 20: 520-527.
- Saila, S. B. 1996. Guide to some computerized artificial intelligence methods, pp. 8-37. In: Megrey, B.A. & Moksness, E. (eds.): *Computers in Fisheries Research*. Chapman and Hall, London.
- Smith, P.N. 1995. A fuzzy logic evaluation method for environmental assessment. *Journal of Environmental Systems* 24: 275-279.
- Smith, P.N. 1997. Environmental project evaluation: a fuzzy logic based method. *International Journal of Systems Science* 28: 467-471.
- Steffler, P. & Blackburn, J. 2002. *River2D. Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat Introduction to Depth Averaged Modelling and User's Manual*. University of Alberta. [Online]: <http://www.river2d.ualberta.ca/software/River2D.pdf>.
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8: 338-353.

CONSULTORÍA ESPECIALIZADA EN:

- ESTUDIOS GEOFÍSICOS
- MÉTODOS SÍSMICOS
- MÉTODOS ELÉCTRICOS
- MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS
- GEORADAR
- GRAVIMETRÍA
- MAGNETOMETRÍA
- GEOFÍSICA DE POZO
- GEOFÍSICA MARINA
- AUSCULTACION DE ESTRUCTURAS
- INSTRUMENTACIÓN
- ESTUDIOS PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES
- ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS
- ASISTENCIA TÉCNICA
- PROYECTOS OBRA CIVIL
- PROYECTOS AMBIENTALES
- PROYECTOS INGENIERÍA DE MINAS



Método geofísico Tomografía Eléctrica



Control y Asistencia Técnica



Método geofísico geo-radar

OFICINA VALENCIA:
C/ Santa Genoveva Torres, 30, bajo
46019 Valencia
Tel +34 96 3688307 Fax: +34 96 3688308
E-mail: valencia@inema.net

Delegación en Marruecos