

Estimación de caudales ecológicos basada en simulación del hábitat físico en un pequeño río del sudeste de Brasil

Da Costa, M.R.^{1,2*}, Moretti Mattos, T.², Muñoz-Mas, R.³, Martínez-Capel, F.^{3*},
Fernandes, V.H.⁴, Araújo, F.G.²

¹ Centro Universitário Módulo - Marginal Maria D'Assumpção Carvalho, 1.000. Martim de Sá/Caraguatatuba, SP

² Laboratório de Ecologia de Peixes, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,
BR 465, Km 7, 23.890-000, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

³ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC), Universitat Politècnica de València,
C/ Paranimf 1, 46730 Grau de Gandia. Valencia. España,

⁴ Colégio Técnico da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RODOVIA BR 465 - km 8 - S/Nº - Seropédica - RJ

*e-mail: profmar@gmail.com | fmcapel@dihma.upv.es

Resumen

El método de simulación del hábitat físico, integrado en el marco de la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) y en otros marcos metodológicos hoy día, utiliza variables hidráulicas e índices de idoneidad del hábitat (a escala de microhábitat) para predecir los cambios potenciales del hábitat al cambiar el caudal circulante. Este enfoque se ha utilizado para simular los cambios potenciales de idoneidad del hábitat para tres especies de peces tropicales de diferentes órdenes, *Bryconamericus ornaticeps*, *Ancistrus multispinis* y *Geophagus brasiliensis*. El estudio se realizó en dos tramos de un río en la zona de mata atlántica al sudeste de Brasil, durante el verano de 2013 e invierno de 2014. Se midieron las características topográficas e hidráulicas por transectos (calado, velocidad media, tipos de sustrato) y se estudió el uso del microhábitat por los peces mediante observación directa bajo el agua (snorkelling); esto permitió elaborar curvas de idoneidad de microhábitat para las tres especies. Mediante la simulación del hábitat físico se obtuvieron las curvas que relacionan dos indicadores, el HSI (índice medio de idoneidad en un tramo), y el HPU (Hábitat Potencial Útil) con el caudal del río. Sobre dichas curvas se observaron los caudales importantes para el mantenimiento de los hábitats de las tres especies. Los resultados indicaron un caudal mínimo-minimorum de $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en época seca para conservar el hábitat de los peces. También se determinó un rango óptimo de $0.65\text{-}0.85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el hábitat de las tres especies. Los resultados pueden apoyar la elaboración de una primera propuesta de régimen ecológico de caudales, en el marco de un proceso de gestión adaptativa de los recursos hídricos, para conservar la salud del río São Pedro y los diversos servicios ecosistémicos que aporta a la sociedad.

Palabras clave: Curva caudal-HPU, Curvas de Idoneidad de Hábitat, Metodología IFIM, Microhábitat, Peces Neotropicales, Restauración de ríos.

1. Introducción

Los regímenes de caudales y la estructura del hábitat físico son dos componentes principales de los ecosistemas fluviales que determinan la presencia, abundancia y distribución de los organismos acuáticos (Karr *et al.*, 1986; Bunn y Arthington, 2002). Las metodologías basadas en la simulación del hábitat integran hidráulica y biología para predecir cambios en la calidad y cantidad de hábitat, simulando así la dinámica fluvial. Dicha información permite la determinación del índice medio de idoneidad de hábitat (HSI) de las especies representativas y curvas de caudal versus hábitat potencial útil (HPU) que es un indicador de la idoneidad media de un sistema lótico para una especie acuática en particular.

Se adoptó este enfoque de simulación del hábitat para predecir y evaluar los efectos ecológicos de diferentes caudales en tres especies de peces neotropicales de

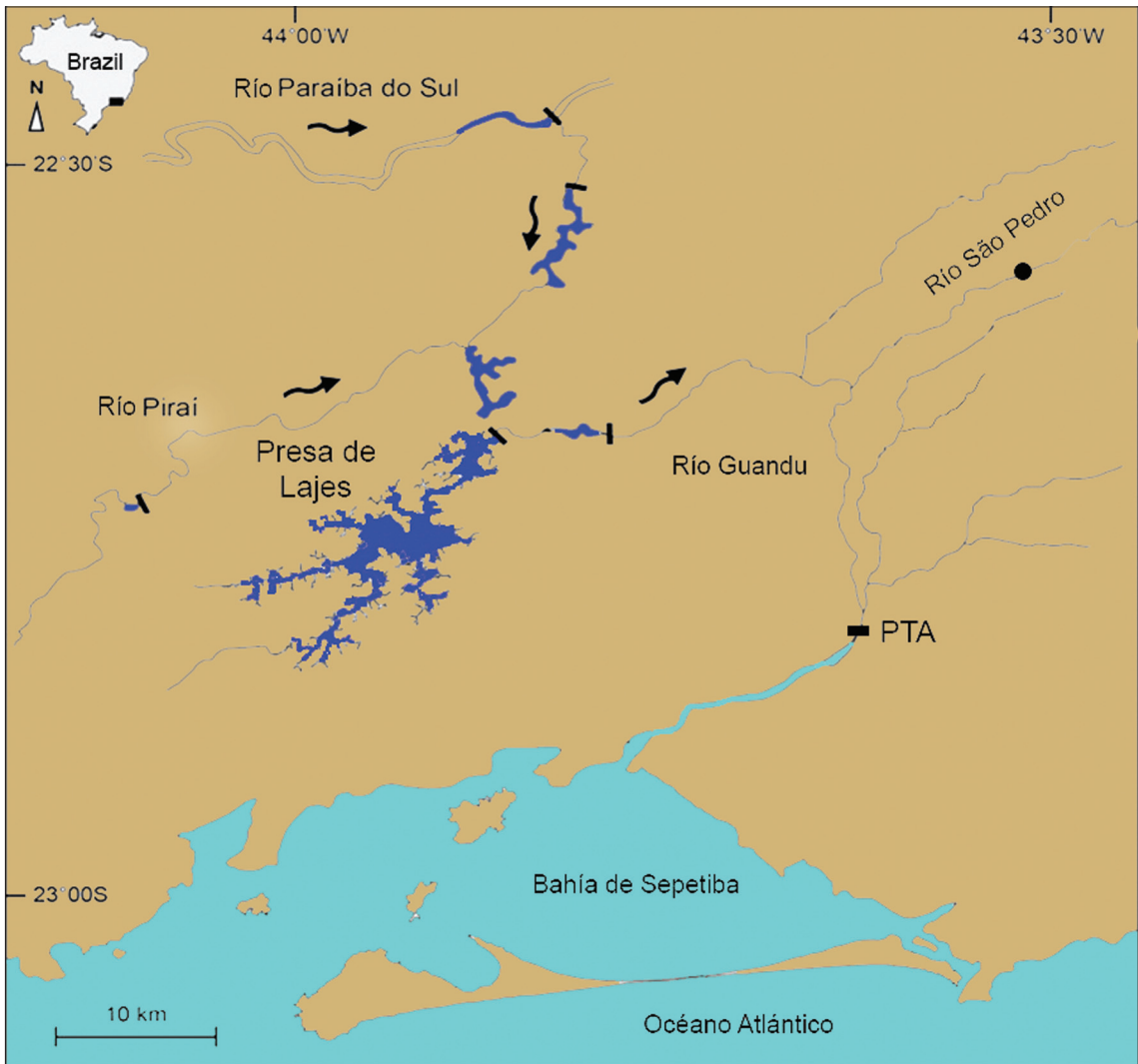


Figura 1. Localización de la cuenca del río Guandú al suroeste de Brasil, y del tramo de estudio en el río San Pedro dentro de dicha cuenca hidrográfica.

diferentes órdenes, *Bryconamericus ornaticeps*, *Ancistrus multispinis* y *Geophagus brasiliensis*. El estudio se llevó a cabo en el río São Pedro (22° 35 'S y 43° 33' W), un afluente de segundo orden de la cuenca del Río Guandu, situada en un área de bosque Atlántico cerca del área metropolitana de Río de Janeiro (*Fig. 1*). La cuenca del río São Pedro tiene una superficie de 98 km² con un cauce de 28 km de longitud. Su caudal natural medio es de aproximadamente 1.8 m³ s⁻¹, del cual c.a. 0.58 m³ s⁻¹ (medida in situ) se abstrae por la CEDAE (Empresa estatal de agua y alcantarillado) para el suministro de algunos municipios cercanos. Se estudiaron dos tramos fluviales bien conservados entre los tramos de montaña. Esta es una buena oportunidad para abordar el estudio de caudales ecológicos o ambientales, al estar la zona de estudio dentro de un área protegida (la Reserva Biológica de Tinguá), con excelentes condiciones de conservación, y verse afectada por la extracción de caudal.

2. Materiales y Métodos

Se realizaron dos campañas de campo, la primera durante el verano de 2013 (temporada de lluvias) y la segunda en el invierno de 2014 (época seca). Se midieron las características topográficas e hidráulicas (calado, velocidad y tipo de sustrato) en dos tramos, superior e inferior, con nueve y diez secciones transversales para la ejecución de la simulación del hábitat con el modelo unidimensional. Cada tramo tenía una longitud de 50 m separadas por una distancia de 100m. Todas las secciones vieron su perímetro mojado dividido en celdas de 0,5 x 0,5 m para la medición de las condiciones hidráulicas y la observación subacuática directa. El levantamiento topográfico se realizó con una estación total Leyca[®] y los datos fueron depurados utilizando el software GNSS Solution and Data GeoOffice. El caudal medio en cada campaña que fue obtenido de las mediciones en las secciones transversales, y el nivel del agua, permitieron la calibración del modelo y el cálculo de las curvas de gasto (altura-caudal) en cada sección transversal, utilizando el software RHYHAB-SIM (Jowett, 1989).

Se aplicó la observación directa bajo el agua (snorkelling) para identificar la presencia/ausencia de las 3 especies a escala de microhábitat, con un total de 60 horas de observación. Dichas observaciones se utilizaron para construir las curvas de idoneidad del hábitat, que muestran el uso de distintos microhábitats por cada especie. Las curvas de idoneidad de hábitat para cada variable fueron utilizadas en la simulación del hábitat físico para obtener el HSI y HPU *versus* caudal y para, finalmente, proponer los caudales ecológicos mínimos y óptimos para las especies clave.

3. Resultados y discusión

Los datos hidráulicos de ambos tramos fueron combinados para una breve descripción del área de estudio. Así, el calado medio –profundidad– osciló entre 0.25 y 1.25 m, con una única moda de c a. 0.65 m. La velocidad media osciló entre 0.05

y 0.65 m s^{-1} , con 70% de los datos concentrados entre 0.05 y 0.1 m s^{-1} . Los tipos de sustrato presentaron dos modas, grandes bloques y arena mientras que bloques representó 25% de la frecuencia total. Los tipos restantes de sustrato presentaron frecuencias inferiores a 10%.

Las curvas de idoneidad de hábitat (*Fig. 2*) para el calado –profundidad– mostraron que *B. ornateiceps* seleccionaba microhábitats con una profundidad media (0.6 m) y un rango más estrecho, en comparación con *A. multispinis* que presentaba un rango más amplio y, especialmente, *G. brasiliensis*, que se asoció tanto a sitios someros (0.35 m) como profundos (0.9 m). En cuanto a velocidad media, todas las especies seleccionaron principalmente velocidades muy bajas, con un máximo alrededor de 0.1 m s^{-1} , para posteriormente mostrar una tendencia descendente para velocidades mayores. Las curvas –histogramas– para tipos de sustrato indicaron que *B. ornateiceps* se asoció con una amplia variedad de clases de sustrato, tal como grande bloques, bloques, cantos rodados y arena. *A. multispinis* seleccionaba especialmente los tres sustratos más gruesos (idoneidad > 0.5), y *G. brasiliensis* seleccionaba los grande bloques y la arena (idoneidad > 0.5).

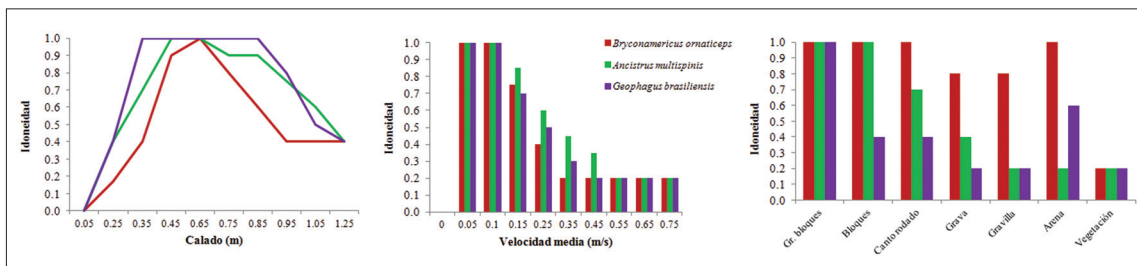


Figura 2. Curvas de idoneidad de microhábitat para calado (m), velocidad media (m s^{-1}) y tipos de sustrato para las tres especies de peces del río San Pedro.

A falta de una legislación específica brasileña, el análisis de los caudales significativos se basó en los criterios especificados en el la instrucción para la planificación hidrológica –IPH– española. Esta norma establece que el caudal mínimo para cada especie analizada debe ser aquel que proporciona un 50 % del HPU máximo o, en curvas monótono-crecientes, aquel que muestra un cambio brusco en la tendencia de la curvas, HSI y HPU *versus* caudal.

En el tramo superior, las curvas de HSI medio del tramo (*Fig. 3, arriba*) indican un cambio brusco de pendiente a $0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para dos de las tres especies (*B. ornateiceps* y *A. multispinis*); conforme el caudal aumenta las curvas se hacen casi horizontales y después decrecen levemente. Por tanto, estas curvas tienen un máximo, pero el HSI es muy estable para caudales más allá del cambio de pendiente. De modo parecido, las mismas dos especies tienen curvas de HPU con fuertes cambios de pendiente; después de $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ la pendiente es muy baja y estable, de modo que el HPU se incrementa muy poco y tiende a una curva horizontal. Las curvas de la otra especie (*G. brasiliensis*) para ambos indicadores muestra un perfil distinto, sin cambios bruscos de pendiente. Con respecto al criterio español del 50 % del máximo HPU, en el tramo superior correspondería con $0.65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Considerando los va-

lores mencionados, y según el principio de precaución, en el tramo superior se ha considerado un caudal mínimo de $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En este momento es importante mencionar el principio de precaución al seleccionar el caudal mínimo, pues dicho caudal se escoge en la zona más sensible de la curva, donde pequeños cambios de caudal pueden producir grandes pérdidas de calidad y cantidad de hábitat. Otro caudal relevante es el de $0.65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que marca el óptimo HSI para *G. brasiliensis*, mientras que las otras dos especies mostraban curvas casi horizontales.

En el tramo inferior, las dos especies mencionadas antes tenían un cambio de pendiente en la curva de HSI (Fig. 3, abajo); sin embargo con caudales altos la curva no se estabiliza sino que crece lentamente hasta un máximo en $0.85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para después descender lentamente. La otra especie tenía un cambio brusco de pendiente en dicho caudal, para después ascender levemente. Las curvas de HPU no tienen ningún cambio de pendiente, para ninguna especie, sino un perfil de ascenso suave, hacienda aproximadamente horizontales en los caudales mayores. En este tramo el criterio del 50 % del máximo HPU correspondió a $0.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

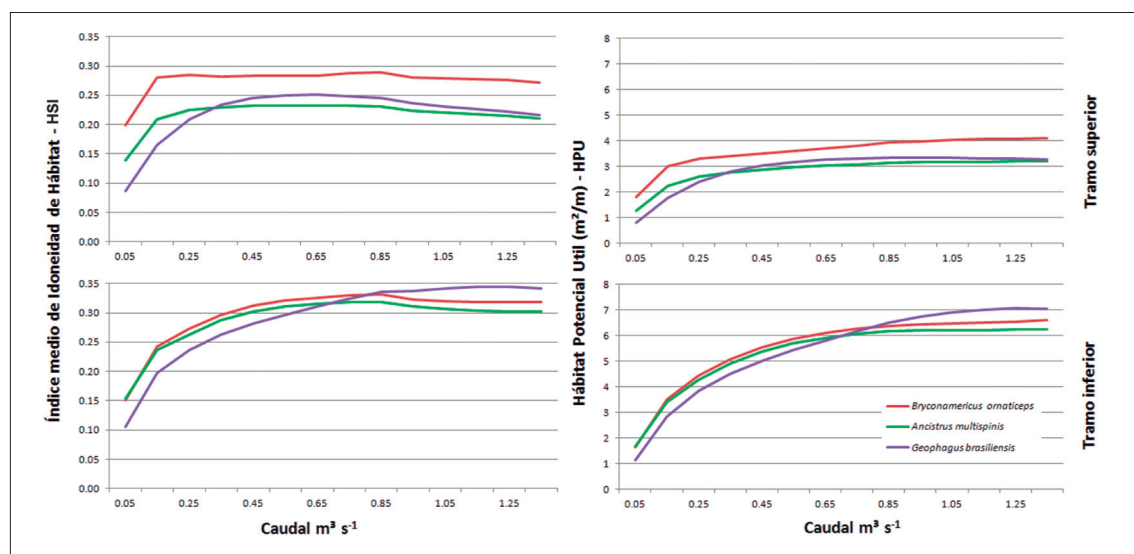


Figura 3. Índice medio de Idoneidad de hábitat (HSI) (A) y hábitat potencial útil (HPU) (B) para las tres especies de peces en los tramos superior e inferior del río São Pedro.

Las tres especies de peces mostraron diferentes curvas de idoneidad de hábitat para calado y tipo de sustrato, con un rango de selección amplio, mientras que las curvas de velocidad fueron similares para las tres especies con un estrecho rango de variación. Dado que la aplicación de esta metodología es poco común en Brasil, no hay curvas de idoneidad para estas especies que pudieran utilizarse para establecer comparaciones. En este estudio, las curvas de idoneidad se desarrollaron durante períodos de caudales bajos (época seca), con el objetivo de determinar caudales mínimos capaces de mantener el funcionamiento de los ecosistemas fluviales, su composición y una estructura similar a la encontrada en condiciones naturales. Pero más adelante, el establecimiento de regímenes de caudales también deberá considerar los

períodos de caudales altos y de inundación, imitando el patrón hidrológico natural, para reducir los efectos negativos de la sedimentación, mantener la forma del cauce del río, para que dichos caudales actúen como señal para el inicio de la migración y desove de algunas especies de peces, y para crear hábitats para la reproducción de especies y alimentación (Richter *et al.*, 2006; Schwartz y Herricks, 2008). Por ejemplo, se ha constatado que diversos géneros de peces neotropicales migran aguas arriba al comenzar las lluvias y las crecidas para reproducirse en el cauce o en la llanura de inundación (Gomes y Agostinho, 1997; Bonetto *et al.*, 1981).

El presente estudio ha permitido determinar con éxito, por primera vez en un río de mata Atlántica, la relación entre el caudal y la calidad del hábitat, que es el primer paso para proponer regímenes ecológicos de caudales. En este caso, el índice medio de idoneidad de hábitat –HSI– fue mayor en el tramo inferior respecto del superior para las tres especies, y sus valores se estabilizan a caudales más altos en comparación con el tramo superior. Encontramos un caudal mínimo crítico de $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; y el rango de caudal entre 0.65 y $0.85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se asoció al máximo de calidad del hábitat para las tres especies, en términos de HSI. Debido a la sensibilidad del hábitat para caudal reducido, en general la propuesta de caudales mínimos provisionales no debe considerar los valores por debajo del caudal mínimo crítico; dicho caudal de $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ es aproximadamente entre dos y tres veces el caudal observado durante el estudio hidráulico, realizado en época seca, en el cual que no se observó ninguna problemática especial respecto a peces o hábitat. Por lo tanto, con los datos hasta el momento, un caudal crítico de $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ podría ser considerado como un caudal mínimo durante la estación seca, hasta que nuevos estudios de hábitat de los peces y la hidrología de los ríos puedan indicar valores más específicos de los caudales adecuados para conservar la ictiofauna y otros organismos acuáticos.

Para un río de segundo orden como el río São Pedro, con un caudal medio de $1.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y varias tomas de agua, este valor podría ser razonable para el mantenimiento de un régimen de caudal similar al natural, asegurando la integridad del sistema durante el período de caudal reducido. Otro caudal en el rango de 0.65 - $0.85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ podría ser considerado como el caudal mínimo en años húmedos durante el período de caudal bajo –estación seca–. Estos valores no se pueden considerar como una propuesta permanente para los caudales ambientales, ya que hay una falta de datos hidrológicos robustos e históricos para inferir el régimen natural de caudales, y en consecuencia, del caudal promedio esperado durante la estación seca con caudales mínimos.

4. Conclusiones

Las tres especies mostraron una selección de hábitat distinto para el calado y el tipo de sustrato. Estos patrones de selección de hábitat a escala de microhábitat también fueron significativos para la selección de hábitat a la mayor escala de las unidades mesohabitat; *Briconamericus ornaticeps* se asoció a microhábitats con pequeña/media profundidad, con una tendencia a velocidades más altas (profundo-rá-

vido y somero-rápido); *Ancistrus multispinis* ocurrió en ambos tramos, con mayor selección por grandes bloques, bloques y cantos rodados (profundo-rápido y somero-rápido); y *G. brasiliensis* se asoció a las zonas más profundas en ambos tramos y bancos poco profundos con materia orgánica (profundo-lento, con arenas).

La metodología de simulación hábitat físico aportó un caudal mínimo crítico ($0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y un rango de caudales óptimos ($0.65\text{-}0.85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), que pueden constituir valores clave para establecer una primera propuesta de regímenes ecológicos de caudales para el mantenimiento de varias especies de peces neotropicales.

Los caudales relevantes obtenidos en el presente estudio, durante la estación seca, se pueden utilizar como bloques de construcción del régimen de caudales ecológicos en el río São Pedro pero estudios ecológicos adicionales serán necesarios para abordar diferentes aspectos del régimen de caudales y las comunidades acuáticas. No obstante, estos caudales pueden apoyar la primera propuesta de un régimen de caudales ecológicos en el marco de un proceso de gestión adaptativa de los recursos hídricos. En dicho proceso, el régimen de caudales ecológicos debe ser revisado y mejorado con el tiempo, sobre la base de los nuevos conocimientos científicos, los avances técnicos y un programa de monitoreo cuidadosamente diseñado para observar la situación de las comunidades acuáticas y ribereñas. La adopción de un enfoque de manejo adaptativo, incluyendo un control coherente y holístico, debe ayudar a los gestores del agua para establecer la protección de los ríos y apoyar los ríos saludables con los diversos servicios ecosistémicos que prestan a la sociedad.

Son necesarios más estudios para desarrollar curvas de idoneidad de hábitat y modelos multivariantes, para especies distintas, con base en datos experimentales y conocimiento experto. Aunque el uso de curvas de idoneidad univariantes es común en estudios de simulación del hábitat físico, especialmente en los programas informáticos más comunes, su uso conlleva varias desventajas, y por tanto el uso de modelos multivariantes se ha ido extendiendo tanto para especies ampliamente distribuidas en el mundo, como por ejemplo la trucha común, así como para especies endémicas de limitada distribución geográfica. De este modo se han desarrollado modelos tanto a escala de microhábitat (Muñoz-Mas *et al.*, 2012, 2014) como de mesohábitat (Costa *et al.*, 2012; Vezza *et al.*, 2012, 2015) para diversas especies. El estudio del régimen natural de caudales en la cuenca del río es también un paso fundamental para mejorar la estimación de los caudales ecológicos, conocer el grado de alteración hidrológica actual y la abstracción de caudales, y aplicar diversos análisis complementarios a la simulación del hábitat físico en un contexto de medio y largo plazo.

5. Agradecimientos

Se dan las gracias al CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) y FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) por la beca-crédito otorgada a Marcus Rodrigues da Costa para realizar los estudios Post-doctorales.

6. Bibliografía

- Bonetto, A.A., Canon Verón, M., Roldán, D. 1981. Nuevos aportes al conocimiento de las migraciones de peces en el río Paraná. *Ecosurellance* 8, 29-49.
- Bunn, S.E., Arthington, A.H., 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environ. Manage.* 30, 492-507.
- Costa, R.M.S., Martínez-Capel, F., Muñoz-Mas, R., Alcaraz-Hernández, J.D., Garófano-Gómez, V., 2011. *Habitat suitability modelling at mesohabitat scale and effects of dam operation on the endangered J. car nase*, Parachondrostoma arrigonis (river Cabriel, Spain). *River Res. Applic.* 28, 740-752.
- Gomes, L.C., Agostinho, A.A. 1997. Influence of the flooding regime on the nutritional state and juvenile recruitment of the curimba, Prochilodus scrofa, Steindachner, in upper Parana River, Brazil. *Fisheries Manag Ecol* 4, 263-274.
- Jowett, I.G., 1989. River hydraulic and habitat simulation, RHYHABSIM computer manual. *New Zealand Fisheries Miscellaneous Report*. 49, 241-248.
- Karr, J.R., Angermeier, P.L., Fausch, K.D., Schlosser, I.J., Yant, P.R., 1986. Assessing biological integrity in running water: a method and its rationale. *Illinois Nat. Hist. Surv.* 5, 1-28.
- Muñoz-Mas, R., Martínez-Capel, F., Garófano-Gómez, V., Mouton, A.M., 2014. Application of Probabilistic Neural Networks to microhabitat suitability modelling for adult brown trout (*Salmo trutta* L.) in Iberian rivers. *Environm Modell Softw* 59, 30-43.
- Muñoz-Mas, R., Martínez-Capel, F., Schneider, M., Mouton, A.M., 2012. Assessment of brown trout habitat suitability in the Jucar River Basin (SPAIN): comparison of data-driven approaches with fuzzy-logic models and univariate suitability curves. *Sci of Total Environm* 440, 123-131.
- Richter, B.D., Lutz, K., Meyer J.L., Warner, A.T., 2006. A Collaborative and Adaptive Process for Developing Environmental Flow Recommendations. *River Res. Applic.* 22, 297-318.
- Schwartz, J.S., Herricks, E.E., 2008. Fish use of ecohydraulic based mesohabitat units in a low-gradient Illinois stream: implications for stream restoration. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 18, 852-866.
- Veza, P., Muñoz-Mas, R., Martínez-Capel F., Mouton, A.M., 2015. Random forests to evaluate interspecific interactions in fish distribution models. *Environml Model Softw. In press.*
- Veza, P., Parasiewicz, P., Rosso, M., Comoglio, C., 2012. Defining minimum environmental flows at regional scale: application of mesoscale habitat models and catchments classification. *River Res. Applic.* 28 (6), 717-730.