

PROPUESTA METODOLÓGICA PRELIMINAR PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN PROYECTOS LICENCIADOS POR EL MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS), COLOMBIA

Preliminary Methodological Proposal for Estimating Environmental Flows in Projects Approved by the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS), Colombia

GABRIEL A. PINILLA-AGUDELO¹, Ph. D.; ERASMO A. RODRÍGUEZ-SANDOVAL², Ph. D.; LUIS A. CAMACHO-BOTERO³, Ph. D.

¹ 1Profesor Asociado, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. gapinillaa@unal.edu.co.

² Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. earodriguezs@unal.edu.co.

³ Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. la.camacho@uniandes.edu.co.

Autor de correspondencia: Gabriel Pinilla, gapinillaa@unal.edu.co

Presentado el 4 de mayo de 2013, aceptado el 27 de agosto de 2013, fecha de reenvío el 15 de septiembre de 2013.

Citation / Citar este artículo como: PINILLA-AGUDELO GA, RODRÍGUEZ-SANDOVAL EA, CAMACHO-BOTERO LA. Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Colombia. Acta biol. Colomb. 2014. 19(1):43-60.

RESUMEN

Se presenta una propuesta metodológica para estimar los caudales ambientales en grandes proyectos licenciados por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) de Colombia, resultado de un convenio interadministrativo suscrito entre el ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) de Colombia y la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (UNC). El método propuesto parte de garantizar criterios hidrológicos, continúa con una validación hidráulica y de calidad del agua, sigue con la determinación de la integridad del hábitat, en un proceso iterativo que requiere evaluación para las condiciones antes y después de la construcción del proyecto y que permite establecer un caudal que, además de conservar las funciones ecológicas del río, garantiza los usos del recurso aguas abajo. Específicamente dentro del componente biótico, la propuesta incluye la determinación y monitoreo de índices de integridad biótica para cuatro comunidades acuáticas (perifiton, macroinvertebrados, vegetación ribereña y peces), a fin de hacer un seguimiento a los efectos que puede producir la reducción del caudal a mediano y largo plazo. Se presentan los resultados de la aplicación de la metodología en varios proyectos licenciados por el MADS.

Palabras clave: caudal ambiental, índice de integridad del hábitat, índices de integridad biótica, proyectos licenciados, Urrá.

ABSTRACT

A methodological proposal for estimating environmental flows in large projects approved by Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) in Colombian rivers was developed. The project is the result of an agreement between the MADS and the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (UNC). The proposed method begins with an evaluation of hydrological criteria, continues with a hydraulic and water quality validation, and follows with the determination of habitat integrity. This is an iterative process that compares conditions before and after the project construction and allows to obtain the magnitude of a monthly flow that, besides preserving the ecological functions of the river, guarantees the water uses downstream. Regarding to the biotic

component, the proposal includes the establishment and monitoring of biotic integrity indices for four aquatic communities (periphyton, macroinvertebrates, riparian vegetation, and fish). The effects that flow reduction may produce in the medium and long term can be assessed by these indices. We present the results of applying the methodology to several projects licensed by the MADS.

Keywords: biotic integrity index, habitat integrity index, environmental flow, licensed projects, Urrá.

INTRODUCCIÓN

El problema de la gestión y el manejo integral y sostenible del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica, en una región y en un país, ha recibido gran atención en la literatura especializada (van Delden *et al.*, 2007, Bharati *et al.*, 2008, Hu *et al.*, 2008, Liu *et al.*, 2008). Dentro de esta problemática, la determinación de los caudales algunas veces denominados mínimos, otras veces ecológicos y otras caudales ambientales, ha despertado gran interés social y científico, por su importancia en la definición, a nivel de sociedad y con criterios científicos sólidos, del uso y aprovechamiento del agua para diferentes propósitos. Estos incluyen los usos ambientales y el funcionamiento ecológico de los ecosistemas, el suministro de agua para consumo e higiene, la generación hidroeléctrica, el riego agrícola y la recreación, entre otros.

En general, la definición del caudal ecológico tiene que ver con la provisión de agua con la calidad, cantidad, duración y estacionalidad necesarias para mantener el funcionamiento ecológico de los sistemas acuáticos. Por su parte, el concepto de caudal ambiental, considerado en este trabajo, incluye el agua en los ríos con suficiente cantidad y calidad para asegurar, además del funcionamiento ecológico, los beneficios ambientales, sociales y económicos (aguas abajo del sitio de intervención), en proyectos como la implementación de embalses, el trasvase a otras cuencas o la construcción de acueductos o distritos de riego (Carvajal *et al.*, 2007).

En la determinación de los caudales ambientales la literatura especializada más reciente (Karim *et al.*, 1995; Tharme, 2003; Acreman y Dunbar, 2004; Pyerice, 2004; Agualimpia y Castro, 2006; Castro *et al.*, 2006) señala que las metodologías existentes se pueden agrupar en cuatro grandes categorías: a) metodologías de tipo hidrológico, b) metodologías de tipo hidrológico e hidráulico con enfoque ecológico, c) metodologías de simulación de hábitat fluvial y d) metodologías holísticas o funcionales. Adicionalmente, algunas propuestas metodológicas recientes (Malan *et al.*, 2003; Palmer *et al.*, 2005) definen una categoría adicional en la cual el componente de calidad del agua se incluye de forma explícita en la estimación de caudales ambientales. A este último conjunto de métodos pertenece la propuesta que se presenta en este documento. De esta manera, se pretende divulgar y poner en discusión una herramienta conceptual y metodológica adaptada a las condiciones colombianas que permite establecer,

con criterios claros y científicos, los caudales ambientales en ríos con proyectos que requieren licenciamiento por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la propuesta para determinar los caudales ambientales en proyectos que requieren licencia ambiental se realizó durante el año 2008 como parte de un convenio entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT- ahora MADS) y la Universidad Nacional de Colombia (UNC). En este proceso se siguieron las siguientes etapas generales: búsqueda bibliográfica sobre los métodos desarrollados en el país y en otras regiones del mundo para estimación de caudales ambientales; análisis de los métodos en cuanto a sus limitaciones y beneficios; desarrollo de una propuesta propia, basada en una serie de criterios que se mencionarán en detalle más adelante; puesta a prueba de la metodología desarrollada con datos de varios proyectos licenciados por el MAVDT; discusión de la propuesta a través de talleres y reuniones con funcionarios del MAVDT y de las empresas generadoras de energía.

Las metodologías revisadas incluyeron los cinco enfoques generales mencionados: técnicas puramente hidrológicas, metodologías hidrológicas e hidráulicas con enfoque ecológico, procedimientos de simulación de hábitat fluvial, métodos holísticos o funcionales y perspectivas recientes que comprenden el análisis de la calidad del agua. En total se analizaron 31 métodos hidrológicos de común aplicación en 12 países, de los cuales los más utilizados en el mundo son el de Tennant (Q95 % o caudal igualado o excedido el 95 % del tiempo) (Tennant, 1976; Reiser *et al.*, 1989) y el 7Q10 (caudal promedio mínimo semanal con período de retorno de diez años, Chiang y Johnson, 1976). De los otros tipos de metodologías estudiadas (cerca de 20), los más reconocidos son el Método del Rango de Variabilidad (RVA, Richter *et al.*, 1996), del cual existe un programa libre denominado *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA), y el método "*The Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM)" (Bovee *et al.*, 1998), que emplea los programas comerciales PHABSIM y RHABSIM (Waddle, 2001). En Colombia la metodología holística más conocida es la del cálculo de Caudales de Garantía Ambiental (Grecco, 2005; SECAB, 2006).

Criterios generales de la metodología propuesta

La revisión bibliográfica y el análisis de los métodos existentes permitió establecer que ninguno de ellos puede aplicarse directamente al contexto colombiano, dadas las limitaciones de información existentes, las particularidades de los problemas de contaminación hídrica del país, el desconocimiento del ciclo de vida de la gran variedad de especies existentes en los ecosistemas de agua dulce, los problemas socioeconómicos de una buena parte de las comunidades ribereñas, las limitaciones de las autoridades ambientales y la falta de aplicación de mecanismos de planeación y gestión del territorio, entre otros aspectos.

Resulta evidente que la filosofía detrás de una propuesta metodológica de estimación de caudales ambientales en Colombia debe estar basada en un enfoque ecosistémico y ambiental, en el que de forma integral hagan parte e interactúen los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua, ecológico, socioeconómico y legal. Para cada uno de estos componentes se definieron criterios específicos que brindan los lineamientos de la propuesta metodológica. A nivel general se considera que una metodología para estimar y evaluar el caudal ambiental debe cumplir con criterios de objetividad (aplicable de la manera más imparcial posible), flexibilidad (ajustable bajo diferentes condiciones de información y en diversos tipos de corrientes), adaptabilidad (capaz de modificarse con base en el seguimiento periódico de las condiciones del río), costo-efectividad (eficaz en balancear los costos de implementación de la metodología y los resultados derivados de su aplicación), integralidad ecosistémica (visión holística del río como sistema ecológico), precaución ambiental (prudencia ante el desconocimiento y las limitaciones de

información), consideración del marco normativo y de gestión ambiental y fundamentación en razones científicas sólidas.

Criterios específicos para el río en estudio

Este tipo de criterios se refieren a la definición de las características generales de la intervención sobre la corriente, la escala de estudio, los estudios específicos requeridos y fundamentalmente la definición de la longitud del tramo afectado, así como la identificación de los usos actuales y prospectivos del agua, abajo del sitio afectado.

Criterios hidrológicos. En la Tabla 1 se describen brevemente los criterios específicos asociados con el componente hidrológico. Estos son el resultado de la identificación de las fortalezas y limitaciones de las metodologías hidrológicas analizadas y de las particularidades del contexto colombiano. Como puede observarse en la Tabla 1, los criterios hidrológicos tenidos en cuenta para el desarrollo de la metodología pretenden asegurar una calidad mínima de la información disponible sobre las características del río que va a ser intervenido.

Tabla 1. Criterios hidrológicos utilizados en la propuesta metodológica de estimación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en Colombia.

Criterio	Definición	Propuesta
1. Información hidrométrica	Número mínimo de estaciones hidrométricas; tipo de información requerida; nivel de agregación temporal; longitud mínima del registro histórico.	Disponer de dos estaciones hidrométricas, una cercana al sitio de intervención para caracterizar el régimen hídrico, y la otra aguas abajo para analizar el balance hídrico y complementar registros faltantes (Fig. 2). Se sugieren series mayores a diez años de caudales mínimos diarios o medios diarios, que cobijen años húmedos, normales y secos.
2. Consistencia y calidad de la información hidrométrica primaria	Análisis de confiabilidad, homogeneidad y consistencia de los registros hidrológicos disponibles.	Detectar registro disímiles (o no homogéneos) (Tukey, 1977), o puntos anómalos en las series, los cuales deben removerse. Evaluar confiabilidad de los caudales obtenidos a partir de niveles, y determinar la validez e incertidumbre de la curva de calibración.
3. Variabilidad hidrológica interanual y estacional de la corriente	Mesa <i>et al.</i> (1997) y Poveda (2004) han demostrado la importante influencia de fenómenos como El Niño y La Niña, en los regímenes hidrológicos de cuencas colombianas.	Estimar los regímenes mensuales de caudales para las condiciones húmedas (La Niña), promedio y secas (El Niño). Valorar intra-anualmente los períodos húmedos, promedios y secos asociados con la Zona de Convergencia Intertropical. Especificar el patrón: bimodal (zona Andina) o monomodal (Costa Atlántica, Orinoquia y Amazonía). Preservar esta variabilidad en los caudales después de la intervención.
4. Consistencia de la propuesta hidrológica con metodologías de tipo hidrológico de estimación de caudales ambientales internacionalmente aceptadas	Coherencia de la propuesta hidrológica con las metodologías hidrológicas más aplicadas	Garantizar caudales ambientales superiores a los estimados con los índices 7Q10 y Q95 %, los cuales pueden subestimar dichos caudales.
5. Comparación de las características hidrológicas para las condiciones sin y con proyecto	Análisis de las características hidrológicas de la corriente, para las condiciones sin y con proyecto (series naturales y series hipotéticas o reales después de la intervención-regla de operación del proyecto).	Comparar umbrales de alteración máxima para las condiciones con y sin proyecto a partir de percentiles de la curva de duración de caudales (CDC), la frecuencia de caudales extremos, y los rangos de alteración del régimen hidrológico para los índices incluidos en el <i>software Indicators of Hydrologic Alteration</i> (IHA).

Criterios hidráulicos y de calidad del agua. Dado que las alteraciones de los caudales en un ecosistema acuático pueden modificar la calidad del agua (Smith *et al.*, 2007) y tener un efecto importante sobre la biota acuática (Dallas y Day, 1993), y puesto que los usos del recurso están limitados por valores admisibles de calidad del agua, se consideran tres criterios a tener en cuenta en la propuesta metodológica, los

cuales se detallan en la Tabla 2. Aquí es importante resaltar que tales criterios involucran algunos aspectos socioeconómicos, dado que los usos del agua pueden ser no solo de consumo sino también para otros efectos como agricultura, ganadería, industria o recreación.

Criterios ecológicos. Los criterios ecológicos propuestos (Tabla 3) pretenden involucrar en la determinación del caudal

Tabla 2. Criterios hidráulicos y de calidad del agua utilizados en la propuesta metodológica de estimación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en Colombia.

Criterio	Definición	Propuesta
1. Evaluación de usos actuales y prospectivos del agua	Se hace referencia a los usos actuales y prospectivos del recurso hídrico que la sociedad o una comunidad particular hayan definido.	Establecer usos actuales y prospectivos aguas abajo del sitio de intervención, definidos por los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas y por las metas y objetivos de calidad establecidos para el río
2. Caracterización hidráulica y de calidad del agua a escala de tramo	Los aspectos hidráulicos relevantes que afectan el IIH y la calidad del agua en la corriente se deben caracterizar (medir) o modelar a la escala y al nivel de tramo, bajo diferentes regímenes de caudal.	Elaborar curvas de nivel versus caudales en algunas secciones transversales. Estimar a nivel de tramo el grado de no uniformidad del flujo y la variabilidad de la velocidad de la corriente (diversidad de hábitats). Medir la calidad del agua en el tramo de interés
3. Evaluación del impacto en la calidad del agua y en el factor de asimilación	El factor de asimilación en el tramo afectado por el proyecto no debe disminuir significativamente y la calidad del agua para el uso previsto no debe deteriorarse por la reducción del caudal. Es posible optimizar la calidad del agua con medidas alternas como plantas de tratamiento.	Modelar matemáticamente la calidad del agua para las condiciones con y sin proyecto en los sitios de captación y uso del recurso. Evaluar el cambio en el factor de asimilación de carga contaminante en el tramo afectado aguas abajo de la derivación, captación o almacenamiento.

Tabla 3. Criterios ecológicos utilizados en la propuesta metodológica de estimación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en Colombia.

Criterio	Definición	Propuesta
1. Enfoque comunitario y no específico	Las variables comunitarias son composición, riqueza, diversidad, e interacciones tróficas	Valorar las comunidades bióticas (peces, macroinvertebrados, perifiton, vegetación ribereña) y su integridad ecológica a través de métricas comunitarias.
2. Utilización de variables que integren información de una determinada comunidad	Las métricas que miden de forma agregada la estructura y función se basan en gremios funcionales y grupos tróficos	Medir la cantidad y calidad del hábitat disponible para cada comunidad. La calidad se basará en nutrientes y transparencia para el perifiton, materia orgánica para los invertebrados, nutrientes y agua en el suelo para la vegetación ribereña, y profundidad, velocidad de la corriente, conectividad y oxígeno disuelto para los peces
3. Empleo de las propiedades de sensibilidad o tolerancia de grupos de especies indicadoras (recurriendo a información bibliográfica)	La sensibilidad o tolerancia de los organismos a cambios en la calidad del agua o a variaciones en las condiciones del hábitat, permite conocer el estado del sistema	Identificar y utilizar preferiblemente grupos de especies indicadoras cosmopolitas que se encuentren en muchos ecosistemas de aguas continentales en el mundo
4. El hábitat como base para el desarrollo de las comunidades	El hábitat es el espacio real en donde se da la relación natural entre el ambiente físico y sus habitantes. Los cambios en su cantidad y calidad se reflejarán en la biota.	Evaluar la disponibilidad y calidad del hábitat a través del Índice de Integridad del Hábitat (IIH), para las condiciones con y sin proyecto, utilizando los resultados de caudales ambientales de las fases previas: hidrológica, hidráulica y de calidad del agua.
5. La integridad biótica como medida del estado de salud del ecosistema	Los índices de integridad biótica (IIB) representan la salud y funcionalidad de las comunidades y por tanto el estado general del ecosistema.	Calcular índices de integridad biótica para peces, perifiton, macroinvertebrados y vegetación ribereña, antes del proyecto (para establecer una línea base) y periódicamente una vez se implementen los caudales ambientales estimados.

ambiental una serie de medidas de algunas comunidades acuáticas fundamentales para el adecuado funcionamiento de los ríos. Tales comunidades son el perifiton (las microalgas adheridas a los sustratos sumergidos), los macroinvertebrados (insectos, moluscos, anélidos, etc.), la vegetación

ribereña (también conocida como vegetación riparia) y los peces. En la Tabla 4 se presentan los elementos bióticos y ecológicos propuestos en la construcción de la metodología, cuyos procedimientos se puedan acoplar a los de los métodos hidrológico, hidráulico y de calidad del agua.

Tabla 4.- Panorámica general de las variables propuestas para la inclusión de los aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS de Colombia.

Variables	Metodología		
Nombre de la variable	Justificación	Datos requeridos (*)	Esbozo de la metodología
Disponibilidad de hábitat de cada comunidad			
Vegetación ribereña	El hábitat tiene significado biológico porque es donde se da la relación natural entre el ambiente físico y sus habitantes.	Área de hábitat de las comunidades y pérdida del mismo a causa del proyecto. Caudales medios y extremos (estiaje e inundación).	Cálculo de valores umbrales de reducción de hábitat general para la biota. Los umbrales se basan en porcentajes permisibles de pérdida del medio físico, sin que se pierda la integridad general del hábitat.
Perifiton			
Macroinvertebrados			
Peces			
Calidad del hábitat para un índice de integridad física del ambiente			
Vegetación ribereña	La calidad indica qué tan apropiado es el hábitat para que pueda ser utilizado por los organismos	Inundabilidad, tabla de agua freática, calidad de los suelos	
Perifiton		Luz (profundidad), nutrientes, régimen de caudales	
Macroinvertebrados		DBO, oxígeno disuelto, granulometría del sedimento	
Peces		Oxígeno disuelto, velocidad de la corriente, profundidad, conectividad	
Índices de integridad biótica (IIB) para cada comunidad			
Vegetación ribereña	Los índices miden la integridad biológica de las comunidades y establecen valores que señalan la pérdida de su funcionalidad ecológica	Pendiente, tabla de agua disponible, suelos, censos de vegetación	El IIB para la vegetación incluye algunas de las siguientes variables: área (cobertura en %), altura promedio, condición de las plantas, densidad, grupos taxonómicos, porcentaje relativo de formas de vida (herbáceas, graminoides, arbustivas, arbóreas, acuáticas), especies exóticas, especies sensibles a la desecación y a la inundación, % de especies anuales, % de especies perennes, número de especies nitrofilicas.
Perifiton		Luz (profundidad), nutrientes, régimen de caudales, muestreos de perifiton, determinaciones de clorofila	El IIB para perifiton incluye algunas de las siguientes variables: composición, abundancia, dominancia, % de especies acidobiontes, % de eutrófenticas, % de móviles, clorofila, peso seco.
Macroinvertebrados		DBO, oxígeno disuelto, granulometría del sedimento, muestreos de macroinvertebrados	El IIB de macroinvertebrados incluye algunas de las siguientes variables: abundancias relativas de grupos funcionales, relaciones entre número de taxones de los grupos funcionales, número de taxones sensibles (efemerópteros, plecópteros, tricópteros), número de taxones tolerantes (dípteros, quironómidos, oligoquetos), índice biótico de familias de Hilsenhoff, BMWP.
Peces		Oxígeno disuelto, velocidad de la corriente, profundidad, conectividad, muestreos de peces	El IIB para peces incluye algunas de las siguientes variables: distribución (estenóicas o eurióicas), gremios tróficos, abundancia relativa, riqueza, diversidad, número de especies de rápidos, de especies benthicas de piscinas, de especies pelágicas de piscinas, de especie intolerantes a baja calidad, de especies exóticas, número de ejemplares con anomalías.

(*) Algunas de las variables incluidas en esta columna se refieren a parámetros que podrían influir en el desarrollo de una determinada comunidad, pero que no se tuvieron en cuenta para el desarrollo posterior de los índices ecológicos (IIIH e IIB) debido a la dificultad de modelarlas.

Lineamientos de la propuesta metodológica

La figura 1 muestra la conceptualización general de la metodología propuesta, en la que se resaltan como elementos fundamentales su integralidad, la interacción y flujo de información entre los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua y biótico y el análisis de las condiciones sin (antes) y con (después de la construcción) del proyecto. Se considera que la propuesta metodológica puede comenzar con la estimación de caudales mensuales a partir de un análisis hidrológico cumpliendo los tres últimos criterios de la Tabla 1, parte del cual consiste en establecer la ubicación de las estaciones hidrométricas (Fig. 2). Con esta propuesta de caudales mensuales se realizan cálculos hidráulicos, de calidad del agua y del índice de integridad del hábitat (IIH). Si se cumplen el último criterio de la Tabla 2, y el cuarto criterio de la Tabla 3, es decir que no se prevé una alteración sustancial del hábitat ni un cambio en la calidad del agua que afecte los usos actuales y prospectivos predefinidos para la corriente, podría reducirse el caudal del mes correspondiente al cumplimiento definido en el componente hidrológico. Por el contrario, si no se cumplen los criterios de bajo impacto negativo en la calidad del agua y de no alteración del hábitat, el caudal mensual correspondiente debe aumentarse.

Una vez definido el caudal ambiental que satisfaga los criterios antes señalados y el proyecto se encuentre en operación se propone medir las variaciones reales de los Índices de Integridad Biótica (IIB). Si se registra una reducción sustancial con respecto a los índices medidos en la condición previa al proyecto, los caudales ambientales mensuales deberían poderse modificar si se estima necesario. Por supuesto, esto se haría si se establece que la causa de la reducción ha sido inducida por causas o factores generados por el proyecto licenciado.

Implementación de la metodología propuesta

Con base en el conjunto de criterios y lineamientos presentados anteriormente, la Tabla 5 resume las etapas que se deben seguir para poner en práctica la propuesta metodológica. En términos generales, la metodología se desarrolla mediante nueve pasos, los cuales son iterativos, en caso de requerirse modificaciones a los valores de caudales mensuales ambientales obtenidos en etapas previas.

El índice de integridad del hábitat (IIH)

Dos aspectos generales hacen parte del IIH: la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas (perifiton,

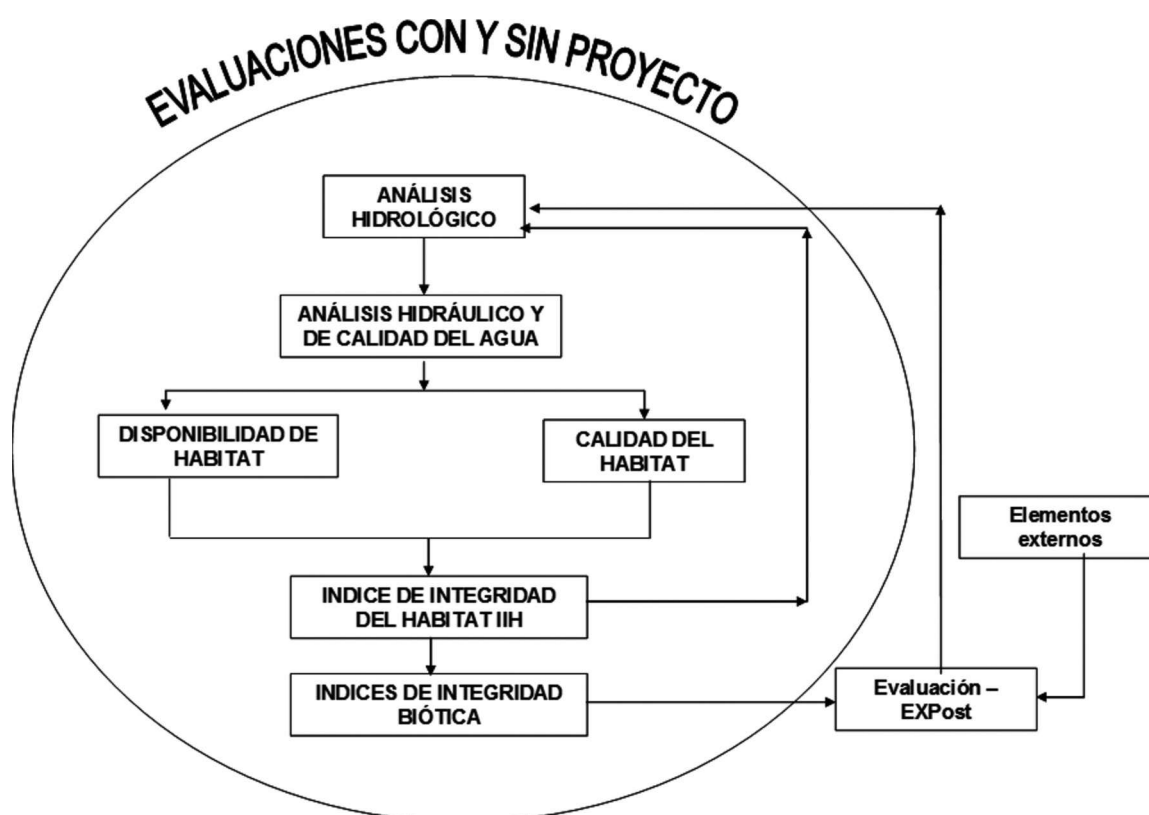


Figura 1. Componentes principales de la propuesta metodológica para el establecimiento de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en ríos de Colombia.

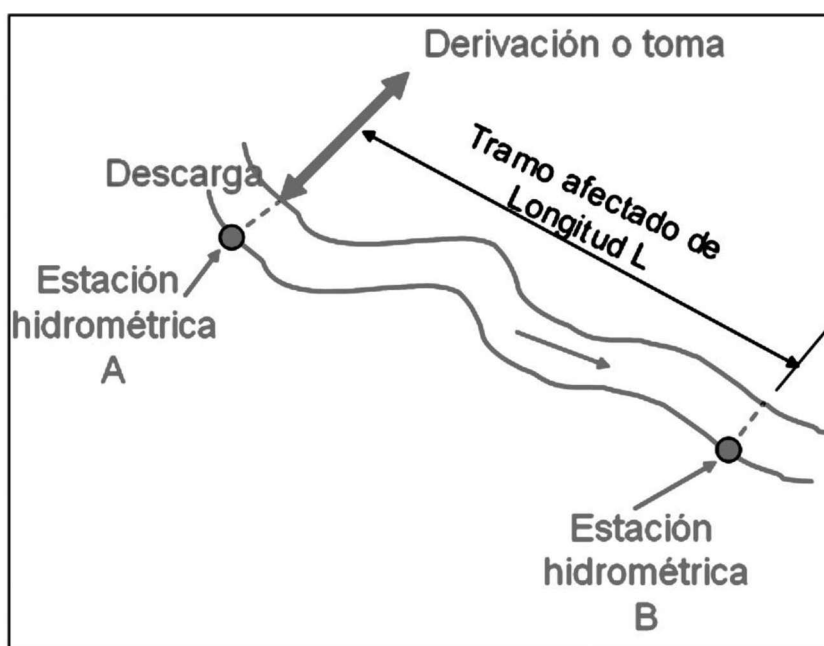


Figura 2. Ubicación de las estaciones hidrométricas para la implementación de la metodología. La estación A debe ubicarse lo más cerca posible al sitio de intervención (< 1,5 km de distancia al sitio del proyecto) y la estación B aguas abajo dentro del tramo afectado o limitando el mismo.

Tabla 5. Pasos para la implementación de la metodología para establecer caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en ríos de Colombia.

Etapas	Procesamiento requerido
1. Recopilación de información y conformación de la línea base	<ul style="list-style-type: none"> Información hidrométrica: datos de dos estaciones hidrométricas en el tramo delimitado del río, con por lo menos 10 años de longitud. Información hidráulica y de calidad del agua: en subtramos. representativos obtención de datos hidráulicos, tales como Profundidad (H), Área (A), Perímetro (P), Ancho Superficial (T), Velocidad media (V) y Velocidad máxima (Vmax). Usos del agua en la zona. Medición de carga contaminante (W). Concentración de determinantes de la calidad del agua. Estimación de tasas de reacción y transformación. Información y línea base de los IIB: muestreos de perifiton, macroinvertebrados, vegetación ribereña y peces. Cálculos de los IIB sin proyecto.
2. Análisis de consistencia, homogeneidad y calidad de la información hidrológica	<ul style="list-style-type: none"> Detección de periodos no homogéneos en las series hidrológicas. Detección y remoción de puntos anómalos. Correlacionar los datos diarios de la estaciones (A y B) a fin de complementar datos faltantes. Excluir de los análisis posteriores años que tengan más de un 10% de registros faltantes. Caracterizar mediante estadística descriptiva las series de datos: media, mediana, moda, máximo, mínimo, varianza, coeficiente de asimetría, coeficiente de variación, primer cuartil, tercer cuartil, histograma etc. Evaluar la recarga promedio anual por escorrentía y por aporte de aguas subterráneas, y su variabilidad en la longitud de río impactada, entre las dos estaciones.
3. Análisis de correlación hidrología – índices de fenómenos macroclimáticos	<ul style="list-style-type: none"> Calcular regresiones multivariadas entre los índices climáticos mensuales de fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña (ENSO). Seleccionar las correlaciones con coeficientes de determinación $R^2 > 0.7$. En caso contrario, calcular correlaciones cruzadas entre los índices mensuales de estos mismos fenómenos y los caudales medios mensuales. Agrupar años bajos condiciones hidrológicas anuales semejantes y realizar estimaciones del caudal ambiental para años secos (El Niño), húmedos (La Niña) y normales. De no encontrarse influencia de los fenómenos macroclimáticos, se sugiere retirar del registro el año más húmedo y el más seco, considerar los restantes como promedio, y realizar estimaciones del caudal ambiental para cada tipo de año (húmedo, promedio y seco).
4. Clasificación de registros por condición hidrológica	<ul style="list-style-type: none"> Clasificar los años en húmedos, promedio y secos mediante la Tabla de Consenso Internacional de años Niño y Niña (Null, 2013). Calcular los caudales medios mensuales para años seco, promedio y húmedos.

Etapa	Procesamiento requerido
5. Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95 %	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Clasificar los años en húmedos, promedio y secos mediante la Tabla de Consenso Internacional. Calcular el índice 7Q10, propuesto por Chiang y Johnson (1976): a partir de caudales medios diarios, aplicar un promedio móvil de ventana de 7 días; construir la serie anual de excedencias con los registros mínimos semanales de cada año; analizarlas frecuencias de eventos mínimos extremos para esta serie anual; y seleccionar el caudal correspondiente al período de retorno de 10 años. Calcular el Q95 % mes a mes a partir de la construcción de las curvas de duración de caudales (CDC) medios diarios (Vogely Fennessey, 1994), de enero a diciembre y para cada una de las tres condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca). ◦ La propuesta inicial de caudales mensuales ambientales, discriminada por mes y para cada una de las tres condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca), corresponde al valor máximo entre el 7Q10 y el Q95 % (max (7Q10, Q95 %)) para el correspondiente mes y condición.
6. Estimación iterativa de la propuesta mensual inicial de caudales ambientales	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Se debe preservar el régimen hidrológico de la corriente limitando la alteración máxima en la CDC para los caudales más bajos (percentiles mayores del 70 %) estableciendo un umbral del 0,5 para la relación entre las CDC sin y con proyecto para los percentiles 70 %, 80 %, 90 %, 92 %, 95 %, 98 %, 99 % y 99,5 %. ◦ Si se garantiza el cumplimiento de este primer criterio el procedimiento continúa con el cálculo de la alteración máxima de las frecuencias de valores mínimos de caudal. La relación entre el caudal post y pre intervención, para el mismo período de retorno, debe ser siempre superior a 0,6. ◦ Si se cumple el criterio anterior, se pasa a la evaluación integral del régimen hidrológico de la corriente a partir de la comparación de las condiciones sin y con proyecto. Para ello se sugiere emplear el método de análisis por rangos de variabilidad (RVA), propuesto por Richter <i>et al.</i> (1996) e implementado en el <i>software</i> libre de <i>The Nature Conservancy</i> denominado <i>Indicators of Hydrologic Alteration</i> (IHA). ◦ Si en cualquiera de los tres pasos anteriores no se cumple el criterio correspondiente, debe iniciarse nuevamente el proceso incrementando los caudales propuestos inicialmente.
7. Cálculos hidráulicos y de calidad del agua y del IIH	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Calcular tiempos de viaje y factores de asimilación a partir de las curvas de calibración de las variables hidráulicas <i>vs.</i> el caudal, construidas con información hidráulica, modelos matemáticos o experimentos con trazadores. ◦ Calcular el factor de asimilación mediante las ecuaciones de estado estable del modelo de calidad del agua ADZ-Quasar (Lees <i>et al.</i>, 1998) ◦ Calcular el criterio de calidad (ver UNC y MAVDT, 2008) para determinar si la propuesta inicial de caudales ambientales mensuales con proyecto impacta la calidad del agua de forma que limite los usos del agua en el tramo. ◦ En caso de no cumplirse el criterio de calidad, debe revisarse el caudal hidrológico propuesto inicialmente a fin de mantener las condiciones fisicoquímicas del río. ◦ Calcular el IIH antes y después del proyecto, utilizando las modelaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua (ver los detalles del cálculo del IIH en el texto). Si el IIH se reduce con respecto a la condición sin proyecto, debe revisarse el caudal propuesto en el punto anterior.
8. Revisión de la estimación inicial mensual de caudales ambientales	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Si es necesario, puede requerirse aumentar el valor del caudal ambiental mensual propuesto de un mes determinado para cumplir el criterio de calidad del agua y de no disminución del IIH. ◦ Si se cumplen los dos criterios anteriores, también se podría disminuir el caudal ambiental mensual propuesto y aumentar la los caudales derivados.
9. Evaluación del impacto del caudal ambiental durante la operación del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Periódicamente (anualmente como mínimo) se deben evaluar los efectos de la disminución de caudal sobre las comunidades bióticas mediante los Índices de Integridad Biótica (IIB), que se detallan en el texto. ◦ Los caudales ambientales estimados deberán modificarse, si se demuestra que su afectación ha sido causada por el proyecto y no por factores externos, a fin de evitar la reducción de la integridad biótica de las comunidades.

macroinvertebrados, vegetación ribereña y peces). La cantidad de hábitat se mide como el área disponible para cada comunidad y la calidad depende de los requerimientos de cada comunidad. Desde el punto de vista de calidad, se tienen en cuenta nutrientes y profundidad para el perifiton, materia orgánica para los invertebrados, disponibilidad de agua para la vegetación ribereña y profundidad, velocidad de la corriente, conectividad y oxígeno disuelto para los peces. Para el cálculo del IIH se utiliza la información que surge de los componentes hidrológico, hidráulico y de calidad del

agua. Este índice multimétrico permite predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las comunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río. En la Tabla 6 se explican las variables utilizadas y en la Tabla 7 se proponen sus respectivos puntajes de acuerdo con la variación esperada en las métricas seleccionadas. Como se ve en la Tabla 7, el puntaje de cada variable oscila entre 0 y 1 (0 para valores que corresponden a sitios en donde la variable muestra condiciones de hábitat poco apropiadas para la biota y 1 para valores en donde la variable

muestra sitios de buenas características ambientales). El IIH es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El IIH fluctúa por tanto entre 0 y 1. Los umbrales propuestos a priori deberán confirmarse o modificarse con base en investigaciones posteriores de campo. Las siglas PR, AR, DH, etc., utilizadas en la siguiente ecuación, corresponden a las variables de la Tabla 7.

$$\text{IIH} = [\text{Puntaje PR} + \text{Puntaje AR} + \text{Puntaje DH} + \text{Puntaje VC} + \text{Puntaje SO} + \text{Puntaje RN} + \text{Puntaje DM}] / 7$$

De acuerdo con el puntaje obtenido en el IIH, la integridad del hábitat se podrá clasificar conforme se especifica en la Tabla 8.

El IIH se calcula para las condiciones antes y después de la construcción del proyecto para los caudales medios men-

suales ambientales de la propuesta hidrológica inicial, una vez cumpla los criterios hidráulicos y de calidad del agua. No se permite que el IIH baje de categoría con el caudal ambiental propuesto, ya que esto estaría indicando un impacto potencial negativo del proyecto en la integridad del hábitat y por ende en la integridad y calidad de las comunidades de perfiton, macroinvertebrados, vegetación ribereña y peces definidas. Si se altera negativamente (disminuye) el valor del IIH para algún mes de la propuesta inicial de caudales ambientales, dicho caudal del mes en cuestión deberá aumentarse iterativamente hasta obtenerse como mínimo el mismo valor del IIH para el caudal medio mensual sin proyecto.

Los índices de integridad biótica (IIB)

A través de los cambios en los IIB, es posible establecer el grado de conservación o deterioro del ecosistema fluvial. El

Tabla 6. Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en ríos colombianos.

Métrica	Tipo	Descripción
Profundidad Relativa	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Medio de la Superficie del Agua] / [Profundidad Media] del tramo estudiado. Corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica corresponde a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota.
Ancho Relativo	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Máximo de la Planicie Inundable] / [Ancho Medio del Canal]. El ancho máximo de la planicie es el ocupado por los caudales máximos. Valores bajos corresponden a lugares con menor interacción entre la zona riparia y el río. Por lo tanto esta relación se hace mayor en sitios más favorables para la biota.
Diversidad de Hábitats	Disponibilidad de hábitat	[Profundidad real del flujo] / [Profundidad normal del flujo]. Una mayor diversidad de hábitats (flujo no uniforme) favorecerá un mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos.
Variabilidad de la Corriente	Disponibilidad de hábitat	[Velocidad Promedio Máxima] / [Velocidad Media]. Una mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece mejores oportunidades para el desarrollo de una biota más diversa.
Saturación de Oxígeno	Calidad del hábitat	Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el agua. Valores altos de saturación muestran un ambiente físico más apropiado para el buen desarrollo de la biota.
Relación de Nutrientes	Calidad del hábitat	[Nitrógeno Total] / [Fósforo Total]. Una relación ideal de estos dos nutrientes para la biota fluctúa entre 14:1 y 20:1. Relaciones por debajo de 7:1 y por encima de 20:1 desfavorecen un buen desarrollo de los organismos.
Demanda Béntica	Calidad del hábitat	Cantidad de oxígeno requerido por los organismos bentónicos para degradar la materia orgánica ($\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Valores altos, pero no exagerados, indican una buena disponibilidad de materia orgánica para los individuos de hábito bentónico.

Tabla 7. Variables físicas y químicas y sus puntajes, utilizadas en la construcción del IIH para la determinación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en ríos colombianos.

Métrica	Puntaje		
	0	0,5	1
Profundidad Relativa (PR)	>200	5 – 50	<5
Ancho Relativo (AR)	<2	2 – 5	>5
Diversidad de Hábitats (DH)	<0,2	0,2 – 4	>4
Variabilidad de la Corriente (VC)	<1,2	1,2 – 1,5	>1,5
% Saturación Oxígeno (SO)	<10 %	10 – 90 %	>90 %
Relación de Nutrientes (RN)	<3 o >30	3 – 6 ó 14 – 30	6 – 14
Demanda Béntica (DM)	<0,5 o >10	2 – 10	0,5 – 2

Tabla 8. Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en ríos colombianos.

Puntaje del IIH	Interpretación	Implicaciones ecológicas
0 – 0,2	Pobre integridad del hábitat	Hábitat inapropiado para el desarrollo de la biota o que genera comunidades de baja diversidad y reducida abundancia
0,21 – 0,5	Baja integridad del hábitat	Las condiciones del hábitat son poco apropiadas para el desarrollo de los organismos
0,51 – 0,8	Moderada integridad del hábitat	Las condiciones del hábitat aseguran un aceptable funcionamiento de los organismos
0,8 – 1	Alta integridad del hábitat	Hábitat con muy buenas condiciones para la biota, que estimula el establecimiento de comunidades diversas y bien representadas

IIB para cada comunidad se evalúa antes del proyecto y se miden sus variaciones reales una vez se implementen los caudales ambientales licenciados. De esta manera, se evaluará si dichos caudales provocan un deterioro importante en las comunidades biológicas; si es así, se tendrán elementos de juicio para proponer medidas que eviten la reducción de la integridad biótica por debajo de los umbrales establecidos.

Los IIB se calculan en cada subtramo del tramo seleccionado, para los mismos sitios en donde se levante la información hidráulica y de calidad del agua. Como mínimo debe hacerse un muestreo en época seca (estiaje) y otro en época lluviosa (aguas altas), por lo que los IIB se calculan para cada periodo y como el promedio de las dos épocas. Los métodos para los muestreos de cada comunidad deben seguir las recomendaciones del MADS. Es muy importante aclarar que los índices propuestos son una primera aproximación y que requieren ajustes y validaciones mediante estudios posteriores. Del conjunto de variables que componen los IIB de cada comunidad, es posible que algunas no sean pertinentes para un río en particular, de manera que estas variables no relevantes podrán eliminarse de los índices con la debida justificación. En ese caso, en el cálculo del IIB respectivo se deben hacer las modificaciones pertinentes.

En el convenio entre la UNC y el MAVDT para desarrollar la propuesta metodológica que se presenta en este artículo, se diseñó un IIB para cada una de las cuatro comunidades fluviales mencionadas anteriormente. A continuación se presenta a manera de ejemplo el IIB de la vegetación ribereña. Los detalles sobre los IIB de las demás comunidades se pueden consultar en UNC y MAVDT (2008).

Índice de Integridad Biótica de la Vegetación Ribereña (IIB_{VegRib}). En la Tabla 9 se muestran los atributos o variables escogidos para medir la integridad biótica de la vegetación ribereña. Se han seleccionado las métricas de tipo comunitario porque aportan muy buena información sobre el estado de esta comunidad, como lo han demostrado los estudios de Ferreira *et al.* (2005), Miller y Wardrob (2006), Miller *et al.* (2006), Reiss (2006), Stromberg *et al.* (2006) y Mack (2007). Las especies sensibles y tolerantes para el caso colombiano deberán establecerse en el futuro con base en estudios que se realicen en el país. Como un primer acercamiento se usó la lista de géneros basada en plantas de humedales de la Florida (Reiss, 2006) y de riachuelos de Pensilvania (Miller *et*

al., 2006). Los atributos de la Tabla 9 se califican como se indica en la Tabla 10. Los valores para ubicar cada métrica en su correspondiente puntaje se modificaron del estudio de vegetación ribereña para ríos ibéricos de Ferreira *et al.* (2005) y del trabajo en vegetación de humedales de Ohio, de Mack (2007). Se recalca que esta es una primera aproximación que deberá corregirse con datos de estudios de ambientes colombianos o al menos neotropicales.

El puntaje de cada variable oscila entre 0 y 1 (0 para valores que corresponden a sitios en donde la variable muestra deterioro y 1 para valores en donde la variable muestra sitios sin alteración). El IIB es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El índice fluctúa entre 0 y 1. Los umbrales propuestos *a priori* deberán confirmarse o modificarse con base en datos de campo. Las siglas EP, EQ, EA, etc., utilizadas en la siguiente ecuación, corresponden a las variables de la Tabla 10:

$$IIB_{VegRib} = [Puntaje EP + Puntaje EQ + Puntaje EA + Puntaje EE + Puntaje ER + Puntaje ES + Puntaje ET + Puntaje B]/8$$

De acuerdo con el puntaje obtenido en el IIB_{VegRib}, la integridad biótica se podrá clasificar de la manera propuesta en la Tabla 11.

Índices de Integridad Biótica para las demás comunidades. En UNC y MAVDT (2008) se detallan los IIB de las otras comunidades seleccionadas (macroinvertebrados, perifiton y peces); en dicho trabajo se pueden consultar las tablas respectivas sobre las métricas, los puntajes y las interpretaciones respectivas de cada comunidad biótica, así como las ecuaciones para calcular sus IIB.

Índice de Integridad Biótica Compuesto (IIB_{Comp}). Finalmente se calcula un índice compuesto que totaliza la integridad biótica de las distintas comunidades del río. Su cómputo, para un determinado sitio de muestreo o para un tramo del río, es como sigue:

$$IIB_{Comp} = [IIB_{VegRib} * FP + IIB_{Perif} * FP + IIB_{Macroin} * FP + IIB_{Peces} * FP]/4$$

Cada IIB se multiplica por un factor de ponderación (FP) que fluctúa entre 0 y 1; la suma de los cuatro FP deberá ser 1. La asignación inicial de los FP es 0,25 para cada comunidad; valores inferiores o superiores deberán justificarse debidamente,

Tabla 9. Métricas de las plantas vasculares seleccionadas para la construcción del IIB de la vegetación ribereña (IIB_{VegRib}) para la valoración de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en Colombia.

Métrica	Tipo	Descripción
Especies ribereñas (riparias)	Estructura de la comunidad	Número de especies ribereñas (plantas no acuáticas que requieren agua freática para su desarrollo; plantas freatófitas). Aumenta el número en sitios conservados.
Especies acuáticas	Estructura de la comunidad	Número de especies acuáticas (plantas que crecen en el agua o en suelos saturados). Aumenta el número en sitios conservados.
% Especies anuales	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas anuales. A mayor deterioro, mayor cantidad de estos taxones no perennes.
% Especies exóticas	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas no nativas. A mayor deterioro, mayor cantidad de estos taxones foráneos.
% Especies ruderales	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas que colonizan ambientes perturbados. A mayor deterioro, mayor cantidad de estos taxones resistentes a la alteración.
% Especies sensitivas	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas sensibles a la perturbación. Se asume que estas especies sensibles son de distribución restringida y que su cobertura se reduce en ambientes perturbados.
% Especies tolerantes	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas tolerantes a la perturbación. Se asume que estas especies son de amplia distribución y que su cobertura se incrementa en ambientes alterados.
Biomasa	Proceso biológico	Cantidad promedio de gramos de materia orgánica seca por metro cuadrado de área en los transectos muestreados en la zona riparia. Esta biomasa se incrementa a medida que el sitio está más alterado, pero se reduce en casos de deterioro extremo.

Tabla 10. Puntajes de las variables utilizadas en la construcción del IIB de la vegetación ribereña (IIB_{VegRib}) para la determinación de caudales ambientales en proyectos licenciados por el MADS en Colombia.

Métrica	Puntaje			
	0	0,3	0,7	1
Especies ribereñas (EP)	0-5	6-15	16-30	>30
Especies acuáticas (EQ)	0-1	2-3	4-5	>5
% Especies anuales (EA)	>15 %	12-15 %	8-11 %	<8 %
% Especies exóticas (EE)	>10 %	8-10 %	5-7 %	<5 %
% Especies ruderales (ER)	>15 %	12-15 %	8-11 %	<8 %
% Especies sensitivas (ES)	<2 %	3-10 %	11-20 %	>20 %
% Especies tolerantes (ET)	>60 %	40-60 %	20-39 %	<20 %
Biomasa (B)	>801 o <100	451-800	201-450	100-200

Tabla 11. Interpretación del IIB de la vegetación ribereña (IIB_{VegRib}) para determinar el estado ecológico del tramo del río con base en esta comunidad.

Puntaje del IIB _{VegRib}	Interpretación	Implicaciones ecológicas
0 - 0,3	Baja integridad biótica de la vegetación ribereña	Estado ecológico deficiente o malo para esta comunidad
0,31 - 0,6	Moderada integridad biótica de la vegetación ribereña	Estado ecológico moderado para esta comunidad
0,61 - 1	Alta integridad biótica de la vegetación ribereña	Estado ecológico bueno o excelente para esta comunidad

de acuerdo con la importancia que una determinada comunidad tenga en un río en particular. La interpretación de este IIB_{Comp} se hace de acuerdo con los puntajes de la Tabla 12. La información que soporta la calificación de cada métrica en los IIB propuestos se basa principalmente en estudios de otras regiones del mundo. Por ello, es necesario propender porque en el futuro estos índices se ajusten con estudios de los ecosistemas lóticos colombianos. No obstante, algunas

comunidades evaluadas, como el perifiton y los macroinvertebrados son muy generalistas y sus integrantes se encuentran ampliamente distribuidos en el mundo, de manera que la indicación disponible a través de las investigaciones internacionales es bastante aplicable al país. Por otra parte, es importante que hacia el futuro se trabaje en lo posible el nivel específico, lo que permitirá un mayor refinamiento de los IIB.

Tabla 12. Interpretación del IIB compuesto (IIB_{comp}) para determinar el estado ecológico del tramo del río con base en todas las comunidades bióticas.

Puntaje IIB _{comp}	Interpretación	Implicaciones ecológicas
0 – 0,2	Pobre integridad biótica de las comunidades acuáticas	Estado ecológico malo del sitio muestreado
0,21 – 0,5	Baja integridad biótica de las comunidades acuáticas	Estado ecológico deficiente del sitio muestreado
0,51 – 0,8	Moderada integridad de las comunidades acuáticas	Estado ecológico moderado del sitio muestreado
0,8 – 1	Alta integridad biótica de las comunidades acuáticas	Estado ecológico bueno o excelente del sitio muestreado

Tabla 13. Índices de Integridad Biótica (IIB) para las comunidades bióticas de cuatro proyectos con caudales licenciados. Entre paréntesis se indica la interpretación de la integridad biótica.

IIB	Río Sogamoso	Río Manso	Río Ariari	Triángulo del Tolima (río Saldaña)
<i>IIB_{Vegetación Riparia}</i>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<i>IIB_{Perifiton}</i>	0,38 (Moderada)	0,49 (Moderada)	0,26 (Baja)	0,56 (Moderada)
<i>IIB_{Macroinvertebrados}</i>	0,31 (Moderada)	0,49 (Moderada)	0,68 (Alta)	0,27 (Baja)
<i>IIB_{Peces}</i>	Sin datos	0,87 (Alta)	0,77 (Alta)	Sin datos
<i>IIB_{Compuesto}</i>	0,4 (Baja)	0,62 (Moderada)	0,57 (Moderada)	0,39 (Baja)

Los IIB del perifiton y los macroinvertebrados se refieren a una escala más fina (microhábitats) que los IIB de la vegetación ribereña y los peces. Estos últimos abarcan una escala espacial que va del tramo a la cuenca. Por lo tanto, la interpretación de los resultados de cada IIB debe hacerse dentro de la escala en la cual se evalúa la comunidad. La existencia de varias escalas espaciales en los IIB debe verse como una ventaja, ya que permite analizar los cambios en la ecología del río en una amplia gama de variaciones territoriales.

Aplicación de la metodología propuesta a ríos licenciados en Colombia

Los proyectos en los cuales se puso a prueba la metodología desarrollada en este trabajo fueron los embalses Urrá I e Hidrosogamoso y el trasvase del río Manso. También se establecieron los índices bióticos para los proyectos de riego del río Ariari y del Triángulo del Tolima en el río Saldaña. La información hidrométrica, hidrológica, de calidad del agua y de comunidades biológicas fue aportada, a través del MADS, por las empresas operadoras de los respectivos proyectos. Para el análisis de los datos hidrométricos disponibles de estos proyectos siguiendo la metodología propuesta, se combinó el uso de hojas de Excel, desarrolladas para específicamente para este trabajo, con herramientas estadísticas como IHA (Richter *et al.*, 1996), XLSTAT (Addinsoft, 2007) y DISPAH (Bustos *et al.*, 2009).

RESULTADOS

La metodología propuesta se aplicó a un número reducido de proyectos, debido a las limitaciones en la disponibilidad y acceso a la información. El procedimiento se realizó de manera iterativa para afinar progresivamente los caudales ambientales y cumplir de esto modo todos los criterios definidos en las tablas 1, 2 y 3. En la figura 3 se muestran los

caudales ambientales mensuales calculados, tanto para los años normales, como para los períodos secos (Niño) y húmedos (Niña), en las represas de Urrá I e Hidrosogamoso y en el trasvase del río Manso. Como es evidente, para los tres proyectos se propone un comportamiento bimodal de los caudales ambientales, en respuesta al régimen hidrológico biestacional de la climatología de las regiones donde se ubican. Igualmente, se observa que los años húmedos requieren caudales ambientales mayores, aunque esta magnitud es notablemente más alta en Hidrosogamoso, zona en la que al parecer hay una mayor diferencia entre los años Niña y Niño. De los tres proyectos analizados, Urrá e Hidrosogamoso son los de mayor volumen, mientras que el trasvase del río Manso maneja caudales relativamente bajos.

En la Tabla 13 se muestran los IIB de las distintas comunidades biológicas, calculados para cuatro proyectos licenciados de los cuales se dispuso de algún tipo de información biótica. Dichos proyectos fueron la represa de Hidrosogamoso, el trasvase del río Manso y los distritos de riego del río Ariari y del Triángulo del Tolima (río Saldaña). Sobre la vegetación riparia no existe información, posiblemente porque no se le ha prestado la debida atención. Las comunidades de perifiton y macroinvertebrados han sido las mejor trabajadas y por tanto las que aportan mayor información. Aunque hay algunos estudios sobre peces, dichos trabajos no contienen en general el tipo de datos que se requieren para elaborar el índice de integridad de esta comunidad. Los ríos Manso y Ariari son los que tienen datos al menos para tres de las cuatro comunidades propuestas. En general, los índices señalan condiciones moderadas en la integridad de la biota de los ríos considerados.

DISCUSIÓN

Para el proyecto Urrá I el caudal ecológico estimado por Gómez Cajiao y Asociados fue de 50 m³/s (Dames & Moore

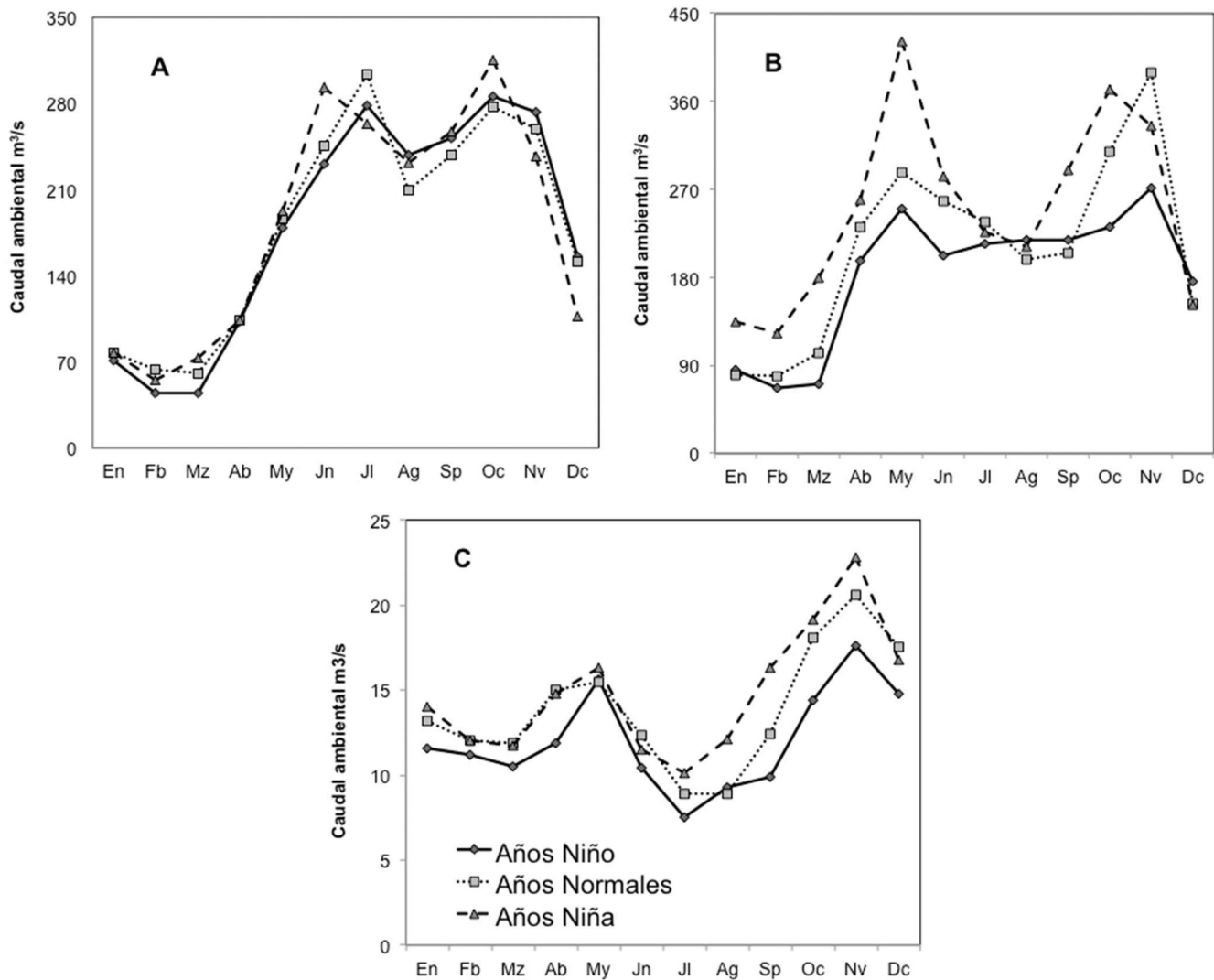


Figura 3. Caudales ambientales establecidos con la metodología propuesta. Se muestran los caudales para años secos (Niño), normales y húmedos (Niña). A: Urrá I; B: Hidrosogamoso; C: Trasvase río Manso.

Inc., 1983) y el determinado por el MAVDT durante el llenado fue de 75 m³/s (MAVDT, expediente 112, folio 1422). Estos dos valores eran fijos y no incluían la estacionalidad de los caudales. Para el mes más crítico (marzo), los caudales obtenidos mediante la metodología planteada varían entre 45 y 73 m³/s (Fig. 3A), es decir, están dentro de los rangos propuestos por Gómez Cajiao y por el MAVDT. Es importante resaltar que los caudales de operación del proyecto estuvieron siempre por encima de la curva de duración de caudales ambientales propuestos (Fig. 4), lo que indica que la implementación de la metodología no implicaría ningún tipo de ajuste sobre la operación actual de esta central hidroeléctrica de Urrá I. Igualmente, existen algunos meses (noviembre, diciembre) en los que la propuesta para años húmedos resulta ligeramente inferior que para años normales, lo cual obedece a la alta variabilidad mensual de los caudales para estos meses. Con respecto a caudales ambientales de Hidrosogamoso, el MAVDT (Resolución 476 de 2000) determinó que durante

el llenado el proyecto debía garantizar un caudal de 80 m³/s. Para la estación Puente La Paz y el mes más crítico (febrero), la propuesta hidrológica mensual de caudales ambientales en un año normal (79 m³/s) resulta bastante consistente con los valores propuestos por el MAVDT. Por supuesto, en meses más lluviosos y años más húmedos, los caudales ambientales calculados aumentan (Fig. 3B) a fin de preservar el régimen hidrológico del río y por ende sus servicios ecológicos y la calidad de sus aguas.

Para el caso del proyecto de trasvase del río Manso la propuesta metodológica para el componente hidrológico no se pudo implementar con la rigurosidad lograda en los proyectos Urrá I y Sogamoso. Esto se debió a la limitación en la información hidrométrica de la estación La Samaria (ubicada en cercanías del sitio del proyecto), de la cual solo se tuvieron datos de los caudales medios mensuales. En la resolución 2282 de 2006, el MAVDT propuso como caudales ambientales 6,0 y 7,2 m³/s para los períodos de sequía y lluvias, respectivamente. Igual-

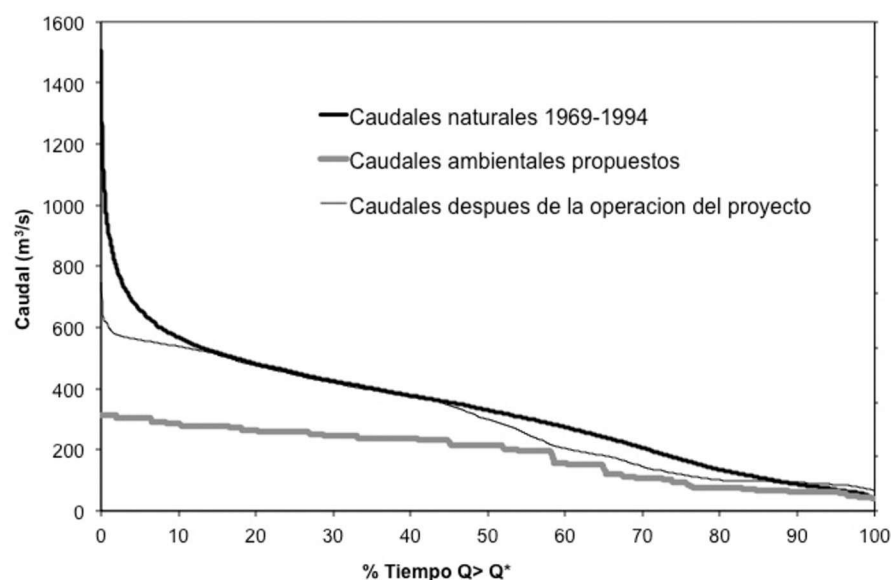


Figura 4. Comparación de las curvas de duración de caudales para las series naturales, los caudales ambientales propuestos y los caudales de operación del proyecto Urrá I.

mente ISAGEN, mediante la aplicación de los programas PHABSIM y QUAL2K, propuso como caudal ecológico el 15 % del caudal medio de la corriente ($13,5 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que equivale a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Parra, 2012). Analizando la condición hidrológica normal, para los meses secos (julio, agosto) la propuesta de la figura 3C ($8,9 \text{ m}^3/\text{s}$) está por encima de la del MAVDT casi en un 25 %, mientras que para los meses húmedos (octubre a diciembre) la propuesta ($17,5$ a $20,6 \text{ m}^3/\text{s}$) es hasta un 40 % mayor a la estimación del MAVDT. Los cálculos obtenidos con la metodología propuesta son preliminares y están sujetos a ajustes en la medida en que se disponga de registros de caudales medios diarios con la longitud requerida. Los datos dejan ver que existen diferencias importantes entre las tres propuestas, lo que hace necesario profundizar en los posibles ajustes que requiera la metodología descrita en este trabajo. En cuanto a los IIB, los resultados mostrados en la Tabla 13 están fuertemente determinados por la naturaleza de los datos disponibles, los cuales son provenientes en su mayoría de estudios de impacto ambiental o de requerimientos del MAVDT. Por lo tanto, la información para valorar las métricas utilizadas en los IIB tuvo que adaptarse de dichos estudios, los cuales no fueron diseñados para determinar tales métricas. Por otra parte, los estudios se realizaron por lo general en épocas previas a la construcción de los proyectos, pero no se tienen datos posteriores al funcionamiento (en los casos que ya se han ejecutado las obras), de manera que los IIB hallados se pueden considerar como indicadores de las condiciones iniciales (línea base).

La integridad de las comunidades que se consignan en la Tabla 13 es un promedio de los distintos tramos de cada río. Esto quiere decir que en una corriente pueden haber tramos con mayor integridad (mejor conservados, menos deteriora-

dos) que otros (más intervenidos, con mayor influencia humana), los cuales no se pueden detectar a partir de los datos disponibles. Los ríos Sogamoso y Saldaña muestran un IIB compuesto bajo y en los ríos Manso y Ariari este índice es moderado. Es muy posible que los estudios que se realicen con un enfoque dirigido específicamente a la construcción de los IIB propuestos permitan una mejor categorización de estas corrientes y por tanto muestren una condición de mayor integridad, como se esperaría en sistemas de poca intervención humana. No obstante, los valores de integridad sí dejan ver una cierta mayor degradación en los ríos Sogamoso y Saldaña.

Sin lugar a dudas la validación realizada en los ríos reseñados arriba resultó muy limitada y se debió a la imposibilidad de acceder a la información primaria completa de cada uno de estos proyectos. Es claro que se deberán evaluar y validar con toda rigurosidad un número mayor de proyectos antes de pensar en proponer el uso generalizado de la metodología propuesta. Además, la metodología descrita no involucra un análisis económico y financiero que cuantifique de forma integral los costos y beneficios asociados al proyecto. Al respecto, se sugiere en el futuro realizar estudios que aborden esta cuantificación.

Otra información que requiere ser ampliada y profundizada para hacer aplicable la metodología propuesta incluye los siguientes aspectos: datos hidrológicos confiables y suficientemente prolongados, a la escala adecuada, lo cual exige una instrumentación apropiada en los ríos colombianos; estudios ecológicos de las comunidades biológicas en cuanto a las métricas sugeridas para los IIB, tales como gremios funcionales, grupos tróficos y especies sensibles y tolerantes; valoraciones juiciosas de la calidad del agua y de los factores

de asimilación en los sistemas lóticos del país; análisis de tipificación y regionalización de los ríos; investigaciones sobre caudales ambientales en proyectos que no requieren licencia ambiental, es decir en aquellas actividades que demanden un menor caudal.

Tan importante como la formulación de esta propuesta metodológica, resulta la adecuada incorporación de la misma dentro de instrumentos de gestión y planificación ambiental como los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas y la normatividad que rige el uso del recurso hídrico. Se requiere por tanto en su implementación la participación de diferentes actores a nivel de cuenca a través, por ejemplo, de Comités o Consejos de Cuencas Hidrográficas, y mediante la definición de los usos prospectivos del agua (incluyendo claramente el uso ambiental) y del suelo. De esta manera, primero se deberían conciliar los usos en conflicto para después aplicar racionalmente la metodología consensuada de estimación de caudales ambientales.

Debe tenerse en cuenta que una metodología general de caudales ambientales para el país debe considerar la gran variabilidad en las características climatológicas, hidrológicas, geológicas y fisiográficas de las distintas regiones de Colombia. Por ello es difícil pensar que pueda existir una propuesta universal para todas las cuencas del país. En este sentido existe una urgente necesidad de realizar una clasificación de corrientes, con el fin de proponer ajustes específicos a la metodología para cada uno de los diferentes tipos de ríos identificados. Al respecto, es importante tener en cuenta ejercicios como el realizado por *The Nature Conservancy* para categorizar los ríos de la cuenca Magdalena-Cauca mediante técnicas ecohidrológicas (González, 2012).

El trabajo desarrollado debe considerarse como una primera fase de un proceso en construcción que tuvo el importante aporte, a través de varias presentaciones de socialización de la metodología y de un taller de aplicación, de autoridades ambientales, académicos, gremios y organizaciones no gubernamentales, pero que sin duda requiere mayor socialización, evaluación y validación. Por este motivo, de ninguna forma la propuesta aquí presentada debe percibirse como una idea terminada, sino como un primer paso e insumo para la formulación de una metodología consensuada para la estimación de caudales ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó mediante el Convenio Interadministrativo OEI –MAVDT n.º 004/07 de 2007, celebrado entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Los autores agradecen a los funcionarios de las dos instituciones por su colaboración en el desarrollo del estudio. Igualmente a Martha Patricia Medina, Angélica Ramírez y Erlendy Bernal, quienes hicieron parte del grupo que desarrolló esta propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- Acreman M, Dunbar MJ. Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrol Earth Syst Sc.* 2004; 8(5):861-876.
- Agualimpia Y, Castro C. Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestión.* 2006;3(1):3-13.
- Angermeier P, Karr J. Applying an Index of Biotic Integrity based on stream-fish communities: Considerations in sampling and interpretation. *N Am J Fish Manage.* 1986; 6(3):418-429.
- Addinsoft TM. XLSTAT-Your data analysis solution. Versión 2007, Barcelona, España; 2007.
- Bharati L, Rodgers C, Erdenberger T, Plotnikova M, Shumilova S, Vlek P, *et al.* Integration of economic and hydrologic models: exploring conjunctive irrigation water strategies in the Volta basin. *Agr Water Manage.* 2008;95(8):925-936.
- Bovee KD, Lamb BL, Bartholow JM, Stalnaker CB, Taylor J. Stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Fort Collins: U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology. Report USGS/BRD-1998-0004; 1998.
- Bustos J, González I, González CA. Software DISPAH 2.0 Distribuciones de probabilidad aplicadas a hidrología. *Rev Fac Nac Agron.* 2009;62(2):97-98.
- Butcher J, Stewart P, Simon T. A Benthic Community Index for streams in the Northern Lakes and Forests Ecoregion. *Ecol Indic.* 2003;3(3):181-193.
- Carvajal Y, Monsalve EA, Castro LM, Chará AMS, Chará JD, Zúñiga MC, *et al.* Una revisión del concepto y los referentes teóricos del caudal ambiental. En: *Memorias VII Semana de la Ingeniería y III Simposio de Investigaciones.* Cali: Universidad del Valle; 2007. p. 583 - 594.
- Castro LM, Carvajal Y, Monsalve E. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ing Univ.* 2006;10(2):179-195.
- Chiang SL, Johnson FW. Low flow criteria for diversions and impoundments. *J Water Res Pl-Asce.* 1976;102(2):227-238.
- Dallas HF, Day JA. The effect of water quality variables on riverine ecosystems: a review. Pretoria: Water Research Commission. Report TT 61/93; 1993.
- DAMES & MOORE INC. Alto Sinu project environmental study: final report. Washington: Gómez Cajiao y Asociados Cia. Ltda. Ingenieros Consultores; 1983.
- Dodds W, Jhones J, Welch E. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Res.* 1998;32(5):1455-1462.
- Ferreira M, Rodríguez-González P, Aguilar F, Albuquerque A. Assessing biotic integrity in Iberian rivers: Development of a multimetric plant index. *Ecol Indic.* 2005;5(2):137-149.
- Fore L, Grafe C. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (U.S.A.). *Freshwater Biol.* 2002;47(10):2015-2037.

- González F. Agrupación ecohidrológica de corrientes en la cuenca Magdalena-Cauca dentro del marco de referencia ELOHA, empleando mapas autorganizados de Kohonen [tesis maestría]. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana; 2012.
- Grecco A. Metodología para la determinación de los caudales de garantía ambiental. *Rev EPM*. 2005;15(3):153-173.
- Griffith M, Hill B, McCormick F, Kaufmann P, Herlihy A, Selle A. Comparative application of indices of biotic integrity based on periphyton, macroinvertebrates, and fish to southern Rocky Mountain streams. *Ecol Indic*. 2005; 5(2):117-136.
- Harris J, Silveira R. Large-scale assessments of river health using an Index of Biotic Integrity with low-diversity fish communities. *Freshwater Biol*. 1999;41(2):235-252.
- Hill B, Herlihy A, Kaufmann P, Decelles S, Vander-Borgh M. Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecol Indic*. 2003; 2(4):325-338.
- Hu W, Wang G, Deng W, Li S. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe river basin, China. *Ecol Eng*. 2008;33(3-4):231-244.
- Karim K, Gubbels Me, Goulter IC. Review of determination of instream flow requirements with special application to Australia. *Water Resour Bull*. 1995;31(6):1063-1077.
- Karr J. Assessment of Biotic Integrity using fish communities. *Fisheries* 1981;6(6):21-27.
- Kerans BL, Karr JR. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of Tennessee Valley. *Ecol Appl*. 1994;4(4):768-785.
- Lees MJ, Camacho LA, Whitehead P. Extension of the QUASAR river quality model to incorporate dead-zone mixing. *Hydrol Earth Syst Sc*. 1998;2(2-3):353-365.
- Liu Y, Gupta Y, Springer E, Wagener T. Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modelling approach to supporting sustainable water resources management. *Environ Modell Softw*. 2008;23(7):846-858.
- Mack JJ. Developing a wetland IBI with statewide application after multiple testing iterations. *Ecol Indic*. 2007;7(4):864-881.
- Malan H, Bath A, Day J, Joubert A. A simple flow -concentration modelling method for integrating water quality and water quantity in rivers. *Water SA*. 2003;29(3):305-311.
- Mebane C. Testing bioassessment metrics: macroinvertebrate, sculpin, and salmonid responses to stream habitat, sediment, and metals. *Environ Monit Assess*. 2001;67(3):293-322.
- Mesa G, Poveda G, Carvajal LF. Introducción al Clima de Colombia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas; 1997.
- Miller S, Wardrop D. Adapting the floristic quality assessment index to indicate anthropogenic disturbance in central Pennsylvania wetlands. *Ecol Indic*. 2006;6(2):313-326.
- Miller S, Wardrop D, Mahaney W, Brooks R. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania. *Ecol Indic*. 2006;6(2):290-312.
- Null J. El Niño and La Niña Years and Intensities. 2013 [citado 18 de febrero de 2013]; [1 pantalla]. Disponible en: URL: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Palmer CG, Rossouw N, Muller WJ, Scherman PA. The development of water quality method within ecological reserve assessment, and links to environmental flow. *Water SA*. 2005;31(2):161-170.
- Parra E. Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales [tesis de maestría]. Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia; 2012.
- Poveda G. La hidroclimatología de Colombia. Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Rev Acad Colomb Cienc*. 2004;28(107):201-222.
- Pyerce R. Hydrological low flow indices and their uses. Peterborough: Watershed Science Center, Trent University, WSC Report No. 04; 2004.
- Reiser DW, Wesche TA, Estes C. Status of streamflow legislation and practices in North America. *Fisheries* 1989;14(2):22-29.
- Reiss K. Florida Wetland Condition Index for depression forested wetlands. *Ecol Indic*. 2006;6(2):337-352.
- Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv Biol*. 1996;10(4):1163-1174.
- Secretaría Ejecutiva del Convenio Andrés Bello (SECAB). Metodología propuesta para la estimación del caudal ecológico. Bogotá: SECAB; 2006.
- Smith A, Bode R, Kleppel G. A nutrient biotic index (NBI) for use with benthic macroinvertebrate communities. *Ecol Indic*. 2007;7(2):371-386.
- Springe G, Sandin L, Briede A, Skuja A. Biological quality metrics: their variability and appropriate scale for assessing streams. *Hydrobiologia*. 2006;566:153-172.
- Stribling J, Jessup B, White J, Boward D, Hurd M. Development of a Benthic Index of Biotic Integrity for Maryland Streams. Annapolis: Maryland Department of Natural Resources, Report No. CBWP-EA-98-3; 1998.
- Stromberg J, Lite S, Rychener T, Levick L, Dixon M, Watts J. Status of the riparian ecosystem in the upper San Pedro River, Arizona: application of an assessment model. *Environ Monit Assess*. 2006;115(1-3):145-173.
- Tharne R. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Res Appl*. 2003;19(5-6):397-441.
- Tennant D. Instream flow requirements for fish, wildlife, recreation and environmental resources. En: Osborne, J., Alman, C, editors. *Proceedings of the Symposium on Instream Flow Needs II*. Bethesda: American Fisheries Society; 1976. p. 359-373.
- Thorne R, Williams P. The response of benthic macroinvertebrates to pollution in developing countries: a multimetric

- system of bioassessment. *Freshwater Biol.* 1997;37(3):671-686.
- Tukey J. *Exploratory Data Analysis*. Boston: Addison-Wesley; 1977.
- Universidad Nacional de Colombia (UNC), Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados. Informe Final. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2008.
- Van Delden J, Luja P, Engelen G. Integration of multi-scale dynamic spatial models of socio-economic and river processes for river basin management. *Environ Model Softw.* 2007;22(2):223-238.
- Vogel R., Fennessey N. Flow duration curves. I. New Interpretation and Confidence Intervals. *J Water Res Pl-Asce.* 1994;120(4):485-504.
- Waddle T. *Phabsim for Windows, User's Manual and Exercises*. Fort Collins: U.S. Geological Survey; 2001.

