

ENFOQUE PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES CONSIDERANDO LA PROYECCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

APPROACH FOR THE ESTIMATING OF THE ENVIRONMENTAL FLOWS CONSIDERING THE WATER QUALITY PROJECTION AND CLIMATE CHANGE

Manuel Gonzales K.¹, Gonzalo de la Fuente de Val²

RESUMEN

El objetivo de este artículo es estimar caudales ambientales usando dos métodos hidrológicos, un método hidráulico y un modelo de hábitat, considerando aspectos de calidad del agua y escenarios de cambio climático en Perú. Se asume que el cambio climático en el Perú, al 2030, bajo un escenario de altas emisiones (A2), generaría una disponibilidad espacial hídrica variada. A partir de esta asunción, se presentan tres escenarios: escenario 1, situación actual; escenario 2, los caudales se incrementan un 14%, y escenario 3, los caudales se reducen un 14%. Para cada escenario se estiman los caudales ambientales, y para cada uno de estos se proyecta la calidad del agua usando el software libre QUAL2KW. Para efectos de comparar y discutir los resultados de la calidad del agua, se usa el Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA).

Palabras clave: caudales ambientales, cambio climático, calidad del agua, QUAL2KW, índice de calidad del agua.

ABSTRACT

The main objective of this paper was to estimate environmental flows by using two hydrological methods, an hydraulic method and habitat model, taking account of water quality and climate change scenarios in Peru. It is assumed that climate change in Peru, in 2030 using a high emissions scenario (A2) generate a wider availability of water. Here in the current situation: Scenario 1, while Scenario 2, the flows will be increased by 14% and Scenario 3 flows will be reduced by 14%. Based on this assumption three potential scenarios have been established. Under each scenario the environmental flows were estimated and each environmental flow the water quality was estimated using free software QUAL2KW. In order to compare the results of the water quality reference was made to the Simplified Water Quality Index (SWQI).

Keywords: environmental flows, climatic change, water quality, QUAL2KW, water quality index.

¹ CANDIDATO A DOCTOR EN SOSTENIBILIDAD POR LA UNIVERSIDAD EUROPEA DE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE. CASTILLA Y LEÓN, ESPAÑA.

² DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS, ESPECIALIDAD ECOLOGÍA DEL PAISAJE.

I. INTRODUCCIÓN

La investigación tuvo como objetivo estimar caudales ambientales mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y modelos de hábitat, considerando aspectos de la calidad del agua y el cambio climático en el Perú.

GENERALIDADES

A nivel mundial, los métodos de estimación de caudales ambientales son diversos y entre ellos tenemos los hidrológicos, los hidráulicos, los de simulación de hábitat y los holísticos (Dyson et al., 2003). Cada uno de estos métodos se aplica en ríos con condiciones ambientales, sociales y económicas diferentes a las originales (WWF, 2009).

La selección del método para estimar caudales ambientales responde a objetivos y fines específicos de una determinada actividad (p. e. generación hidroeléctrica o embalsar el agua con múltiples propósitos), lo que genera polémicas y dudas entre la sociedad, los entes reguladores y los encargados de implementarlo. Adicionalmente, existen dudas sobre las condiciones de salud ambiental del tramo del río con caudal ambiental y se tiende a pensar que son aguas de mala calidad, mientras que el cambio climático genera en la población la idea de una carestía del agua que pone en peligro sus condiciones de vida presentes y futuras.

El Perú no es ajeno a este enfoque y actualmente se debate el procedimiento para seleccionar los métodos de estimación de caudales ambientales. Este debate está centrado en la cantidad de agua, aborda de manera muy general la calidad del agua (lo considera como un cumplimiento de los estándares de calidad de agua en un momento) y no incluye la incertidumbre generada por el

cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico.

Dyson et al. (2003) definen el caudal ambiental como "el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay empleos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados". Estos mismos autores proponen la siguiente clasificación de los métodos de estimación de caudales ambientales:

- a. Cuadros de consulta
Son los más usados para definir los caudales ambientales y se basan en índices sencillos que se encuentran en cuadros de consulta. Los índices usados son puramente hidrológicos, y en algunas ocasiones se utilizan datos ecológicos.
- b. Análisis por computadora
Estos métodos se centran en el análisis de datos, utilizando datos existentes (p. e. caudales de ríos obtenidos en estaciones de medición y peces a partir de estudios regulares). Estos métodos examinan todo el régimen de caudales de un río considerando la conservación de la integridad, estacionalidad natural y la variabilidad de caudales, incluyendo inundaciones y caudales bajos.

Dentro de este grupo se incluyen los métodos hidráulicos de estimación de caudales ecológicos, siendo el más representativo el del perímetro mojado.

Pese a la versatilidad de este método, la mayor desventaja radica en relacionar variables independientes, como el caudal, con variables bióticas dependientes como población o índices de estructura comunitaria calculada a partir de listas de especies (Dyson et al., 2003).

c. Análisis funcional

Estos métodos incluyen los que desarrollan una comprensión de los vínculos funcionales entre todos los aspectos de la hidrología y ecología del sistema fluvial (Dyson et al., 2003). La información que usa es el análisis hidrológico, información sobre clasificación hidráulica y datos biológicos. La más conocida es la Building Block Methodology, que tiene como premisa básica que las especies fluviales dependen de elementos básicos (bloques de construcción) del régimen de caudales, incluyendo caudales bajos e inundaciones para conservar la dinámica de sedimentos y la estructura geomorfológica del río (Dyson et al., 2003).

d. Modelos de hábitat

Dyson et al. (2003) indica que estos métodos usan datos sobre hábitats de especies especialmente seleccionadas, con el fin de determinar necesidades de caudales ambientales. Dentro de las condiciones ambientales que necesita una especie específica de agua dulce están los aspectos físicos que son los que sufren más impactos por cambios en el régimen de caudal. El modelo de hábitat más conocido es el PHABSIM (simulación de hábitat físico).

MARCO PARA LA EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

Según IUCN (2013), los marcos más empleados para la evaluación de los caudales ambientales son:

a. Metodología Incremental de Caudales (IFIM)

Este método aborda los impactos del cambio en el régimen de caudal sobre los ecosistemas fluviales. Este método se usa para evaluar los

impactos de presas y extracciones, y tiene cinco fases:

Fase 1: Identificar el problema

Fase 2: Planificar el proyecto y describir la vertiente

Fase 3: Desarrollar modelos

Fase 4: Formular y someter a prueba escenarios

Fase 5: Proporcionar insumos para negociaciones

b. Respuesta Río Abajo a Transformaciones Impuestas del Caudal (DRIFT)

Es un marco basado en escenarios y proporciona una serie de opciones de regímenes futuros de caudales para un río determinado, junto con las consecuencias para la condición del río. Este método usa cuatro módulos:

Módulo 1: Biofísico

Módulo 2: Socioeconómico

Módulo 3: Desarrollo de escenarios

Módulo 4: Economía - [financiero]

c. Estrategias de Gestión de Extracción en Vertientes (CAMS)

Esta metodología incluye la participación de las partes interesadas por medio de grupos de interés, un marco de evaluación y gestión de recursos. Incluye los siguientes pasos:

Paso 1: Evaluar características físicas

Paso 2: Pesca

Paso 3: Macrofitas

Paso 4: Macro – invertebrados

- d. Metodología de Bloques de Construcción (BBM)
Se trata de un método holístico, en el que no se consideran solo las necesidades de una o unas pocas especies, ni del comportamiento hidrológico del río, sino que se considera un grupo más amplio de aspectos que contemplan componentes del biotopo y de la biocenosis del ecosistema completo. Este método utiliza datos disponibles y de buena calidad sobre la hidrología, geomorfología y ecología del sistema ripario en estudio. Es esencialmente una aproximación prescriptiva, diseñada para construir un régimen de flujo que se desea mantener en el río.
- La metodología tiene una secuencia lógica de aplicación donde se pueden definir tres grandes grupos:
- [Grupo 1:] Planificación de las jornadas y diagnóstico
- [Grupo 2:] Jornadas de acuerdos
- [Grupo 3:] Toma de decisiones
- a. Nivel 1: Auditoría en el ámbito nacional
Se incluye con el fin de identificar áreas en las que la asignación de agua puede ser potencialmente contenciosa, y una auditoría para determinar el nivel general de la salud fluvial.
- b. Nivel 2: Planificación de la cuenca fluvial
La planificación a escala de cuenca involucra la evaluación de caudales en toda la cuenca fluvial.
- c. Nivel 3: Evaluación de impactos de la infraestructura
La evaluación de caudales ambientales implica evaluar el impacto y la mitigación de modificaciones específicas de caudales, tales como presas o extracciones importantes.
- d. Nivel 4: Restauración de ríos
La restauración conlleva disminuir las extracciones, descarga de agua desde embalses y medidas estructurales, y alteraciones físicas como restablecimiento de meandros.

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR CAUDALES AMBIENTALES

La selección de un método particular depende, sobre todo, de los datos disponibles y de la clase de problema que haya que abordar (Dyson et al., 2003).

Los métodos pueden seleccionarse considerando lo siguiente (Dyson et al., 2003):

MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

Para esta investigación se ha usado el *software* QUAL2KW, disponible en internet y de libre acceso (Chapra, 1997). QUAL2KW es un modelo unidimensional que simula el impacto de contaminantes puntuales distribuidos en un flujo permanente no uniforme y que utiliza un esquema en diferencias finitas hacia atrás para solucionar las ecuaciones diferenciales, el cual produce una sobrestimación del coeficiente de dispersión en la ecuación de transporte (Chin, 2006).

ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)³

Según Ott (1981), los índices ambientales de calidad son una herramienta diseñada para simplificar el análisis de gran cantidad de información, al interrelacionar los elementos o parámetros involucrados en dicho análisis, sin necesidad de estudiar el comportamiento de estos en forma individual, lo que permite el entendimiento y la comparación de la calidad de un ambiente específico. Los ICA más usados son los siguientes (Arroyabe et al. 2013):

- ICA de la Fundación Nacional de Sanidad (ICA-NSF).
- Índice de Calidad del Agua Propuesto por Dinius (1987).
- Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA).

El Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA), ha sido adoptado para esta investigación y fue desarrollado por Queralt (1982) para las cuencas de Cataluña en España. Este índice tiene en cuenta la clasificación de la calidad del agua para usos específicos del recurso e incluye los siguientes parámetros fisicoquímicos: (a) temperatura - T, (b) DQO, (c) material suspendido o sólidos suspendidos - SS, (d) oxígeno disuelto - OD y (e) conductividad eléctrica - Cond.

Para determinar el valor del índice, Queralt (1982) propuso la siguiente ecuación:

$$ISQA = T (DQO + SS + OD + Cond)$$

Los 5 parámetros empleados en el cálculo del ISQA se expresan de manera

gráfica, asignando una curva específica a cada uno, mediante la cual, a partir de los valores del parámetro, se puede obtener el valor del subíndice correspondiente.

CAMBIO CLIMÁTICO

El Intergovernmental Panel on Climate Change (en adelante IPCC) define el cambio climático como la "Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras" (IPCC, 2001).

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO⁴

En 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (REEE) ideados por Nakicenovic y otros (IPCC, 2001). Estos escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a las características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico, y son los siguientes:

- Escenario A1: Describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Este escenario se divide en tres grupos, que se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1F1, de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes A1B.

³ TODA LA SECCIÓN HA SIDO DESARROLLADA CON BASE EN [HTTP://WWW.CVC.GOV.CO/CVC/MOSAIC/BPDF2/VOLUMEN10/1-ECARCpag1-158.PDF](http://www.cvc.gov.co/cvc/Mosaic/bPDF2/VOLUMEN10/1-ECARCpag1-158.pdf). REVISADO EL 10 DE DICIEMBRE 2014.

⁴ DESARROLLADO CON BASE EN [HTTP://WWW.BVSDE.PAHO.ORG/BVSACD/CD50/ESCENARIOS/CAP2.PDF](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd50/escenarios/cap2.pdf). REVISADO EL 20 DE OCTUBRE DE 2014.

b. Escenario A2: Describe un mundo muy heterogéneo, donde la cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger, lo cual acarrea un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

c. Escenario B1: Describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.

d. Escenario B2: Describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y a la equidad social, se centra en las escalas local y regional.

CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PERÚ

En el Perú, los principales efectos del cambio climático estarían asociados a los siguientes fenómenos (Vargas, 2009):

- El retroceso glaciar
- El aumento de la frecuencia e intensidad del fenómeno de El Niño
- La elevación del nivel del mar
- Los cambios en las tendencias de las precipitaciones

En el Perú, la precipitación total anual muestra incrementos (tendencias positivas) en el período 1965-2006, marcados sobre la costa norte, con valores entre un 30 y un 40% sobre sus promedios, mientras que la selva norte presenta disminuciones (tendencias negativas) desde la década de 1960 hasta fines del siglo pasado, con valores entre un 20 y un 30% sobre sus promedios con significancia estadística (Senamhi, 2009).

Respecto de los cambios en las tendencias de las precipitaciones bajo un escenario de cambio climático A2, el Senamhi (2009) indica: "Las lluvias, en un escenario de clima futuro del Perú con altas emisiones (A2), para el 2020 y 2030 no se evidencian grandes cambios en la distribución espacial de las lluvias y están muy relacionadas a su climatología. Las precipitaciones anuales para el 2030 muestran deficiencias mayormente en la sierra entre -10 y -20% y en la selva norte y central (selva alta) de hasta -10%. Los incrementos más importantes se presentarían en la costa norte y selva sur entre +10% a +20%".

En resumen, los objetivos de este trabajo fueron estimar caudales ambientales usando dos métodos hidrológicos, un método hidráulico y un modelo de hábitat, considerando aspectos de calidad del agua y escenarios de cambio climático en Perú.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación contempló los siguientes aspectos:

- a. Porcentajes de variación de los caudales debido al cambio climático
Se tomó como punto de partida la simulación del cambio climático en el Perú (Senamhi, 2009), considerando un escenario de altas emisiones (A2) se determinó la disponibilidad espacial hídrica. Asumiendo una cierta variabilidad de las precipitaciones en el Perú, se estima al 2030 una variación en la misma magnitud. Este análisis genera la siguiente zonificación:

- Zona 1: Descenso de las precipitaciones en toda la sierra del Perú entre un 10 y un 20% de las precipitaciones actuales.
- Zona 2: Descenso en un 10% de las precipitaciones en la selva norte y central del Perú.
- Zona 3: Incrementos entre un 10 y un 20% de las precipitaciones en la costa norte.
- Zona 4: Incrementos de las precipitaciones en la selva sur entre un 10 y un 20%.

Estas zonas sirven para definir (usando el promedio aritmético), el porcentaje de incremento y descenso de las precipitaciones para este trabajo, que es del 14% ($(10+20=30/2=15.15+10+15+15=55/4=13.75 \sim 14\%)$).

Se usan los datos de precipitación considerando que estos en algún momento llegan a un cuerpo de agua a través de los diferentes procesos hidrológicos (p. e. escorrentías, agua subterránea, nieve derretida, etc.), y por lo tanto tienen el mismo efecto sobre los caudales.

- b. Caudales

Los caudales corresponde al río Santa y han sido obtenidos del estudio balance hídrico de la cuenca hidrográfica del río Santa (Osinergmin, 2009) y complementada hasta el 2012 con información del Proyecto Especial Chavimochic.

Se ha seleccionado el río Santa, porque de acuerdo con las zonificación presentada anteriormente corresponde a una zona donde los caudales descenderán un 10% (sierra).

- c. Características hidráulicas del río

Se han seleccionados dos secciones hidráulicas (estaciones de aforo, perfiles hidráulicos o estaciones hidrométricas) de un río de la selva central peruana (Senamhi, 2013).

Se ha seleccionado un río de la selva central del Perú (río Huallaga) por pertenecer a la zona donde los caudales podrían descender un 10%. Además, un río de la selva se caracteriza por sus complejidades hidráulicas y biológicas. Para fines de este trabajo una complejidad biológica es importante al momento de usar el método PHABSIM.

- d. Estimación de caudales ambientales
Para estimar los caudales ambientales se usaron dos métodos hidrológicos (10% del promedio multianual y el índice Q95, también denominado 50% del caudal al Q95), un método

hidráulico (perímetro mojado) y un método de simulación (PHABSIM).

e. Calidad del agua

Se utiliza resultados de calidad de agua del río Rímac, ejecutados por la Autoridad Nacional del Agua como parte del monitoreo participativo de este río (ANA, 2014). Los resultados usados son valores promedios de toda la cuenca. Se usa un valor promedio debido a la gran heterogeneidad de la información disponible. La selección del río se realizó en función de que en este se espera un incremento de las precipitaciones entre un 10% y un 20%.

f. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático usados son los siguientes:

Escenario 1: Condiciones actuales. Usando el caudal promedio de toda la serie se estima el caudal ambiental por los métodos hidrológicos (10% del promedio multianual e Índice Q95, también denominado 50% del caudal al Q95), hidráulicos (perímetro mojado) y PHABSIM. A cada resultado de caudal ambiental se proyectó la calidad del agua usando el QUAL2KW, calculado con el Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA).

Escenario 2: el caudal se incrementa un 14%. Al caudal promedio se le

adicionó un 14% y se procedió de manera similar que en el Escenario 1.

Escenario 3: el caudal disminuye un 14%. Al caudal promedio se le sustrajo un 14% y se procedió de la misma manera que en el Escenario 1.

III. RESULTADOS

El río hipotético tiene 258,50 m de ancho, la profundidad media es de 7,10 m y las velocidades varían entre 0,02 m/s y 0,12 m/s.

La calidad del agua, en dos puntos emplazados aguas arriba y aguas abajo del tramo donde se implementa el caudal ambiental, cumple con el estándar nacional de calidad ambiental para agua del Perú (Categoría 3, riego de vegetales y bebida de animales). Sin embargo, el ISQA calculado permite afirmar que las aguas, antes de estimar los caudales ambientales, cambian de uso, lo que en la práctica se puede interpretar como un deterioro en la calidad de las mismas (pasa de agua para abastecimiento para consumo humano, recreación por contacto directo, piscicultura a agua para riego, industria, abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial).

Los resultados de caudales ambientales obtenidos para cada escenario de cambio climático se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. RESULTADOS DE CAUDALES AMBIENTALES PARA CADA ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Método para estimar caudales ambientales		Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
		Caudal (m3/s)		ISQA	Caudal (m3/s)		ISQA	Caudal (m3/s)		ISQA
		Promedio	Ambiental		Promedio	Ambiental		Promedio	Ambiental	
Hidrológico	Método 50% del caudal al Q95	92,13	10,76	51,3	105,09	13,82	52,1	90,33	10,74	51,4
	Método 10% del caudal promedio	92,13	9,21	51,8	105,09	10,51	44,6	90,33	9,03	43,8
Hidráulico	Perímetro mojado	92,13	3,44	51,8	105,09	4,02	48,5	90,33	3,11	58,9
Simulación de hábitat	PHABSIM	92,13	1,80	51,3	105,09	2,54	51,4	90,33	1,01	54,1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

ISQA: ÍNDICE SIMPLIFICADO DE CALIDAD DEL AGUA.

IV. DISCUSIÓN

ESCENARIO 1: CONDICIONES ACTUALES

WWF (2009) plantea que el caudal ambiental es un régimen adecuado para garantizar la conservación de la biodiversidad y las funciones del ecosistema fluvial. Se espera que los caudales ambientales reflejen las variabilidades anuales e interanuales, y contemplen caudales mínimos mensuales que garanticen el funcionamiento del ecosistema y la salud de las especies fluviales y de la vegetación de ribera. Además, deben desarrollarse caudales de avenidas a distintos niveles y periodicidad, tal y como ocurre en el medio natural, y deben contemplarse unas tasas de cambio de estos caudales adecuadas (para evitar los efectos negativos de una variación brusca de los mismos).

Los caudales ambientales estimados por los tres métodos muestran valores únicos, que son flujos continuos. Estos valores únicos no permitirán replicar los caudales mínimos y de avenidas mensuales, tal como lo señala WWF. Los caudales mínimos y de avenidas estarán modificados por las características de la infraestructura hidráulica que ha requerido la estimación del caudal ambiental, y por lo tanto serán algo mayores para los caudales mínimos y menores para los de avenidas.

El ISQA es 51 en los tres métodos usados, con lo que se mantiene la clasificación definida para las estaciones aguas arriba y aguas abajo, que es para riego, industria, abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial. La disminución en la calidad del agua, respecto a la condición antes de estimar el caudal ambiental, se debería a la disminución del oxígeno disuelto.

Respecto al cambio climático y los caudales ambientales, debe indicarse que, bajo la situación actual, el método hidrológico –50% del caudal al Q95– se produciría una disminución del oxígeno disuelto que afectaría la vida acuática en el tramo con caudal ambiental.

ESCENARIO 2: EL CAUDAL SE INCREMENTA UN 14%

Fiona Dyer et al. (2014), citando a Heathwaite (2010), –sostienen que la "predicción de los efectos hidrológicos del cambio climático se basa generalmente en los cambios volumétricos (como flujos anuales de temporada y media) que reflejan la necesidad de comprender los impactos de abastecimiento de agua de los climas futuros". Los resultados de caudales ecológicos obtenidos para este escenario forman parte de esta afirmación porque consideran incrementos volumétricos que dependen directamente de las precipitaciones, cuya distribución temporal no es coherente. Sin embargo, debe considerarse un esfuerzo por comprender la naturaleza de los cambios en los regímenes de flujo centrado en la salud del río y, a la vez, entender los cambios en el flujo que pueden ser provocados por la variación climática. Por otro lado, los cambios o alteraciones en el flujo del río no permiten identificar los impactos y riesgos para la biota acuática.

El ISQA, en las estaciones aguas arriba y aguas abajo (del tramo regulado por el caudal ambiental), clasifican para uso en riego, industria y abastecimiento para consumo humano con tratamiento especial. En el tramo con caudal ecológico, mantiene la misma clasificación con excepción del método hidrológico –10% del caudal promedio –, que clasifica para uso en recreación por contacto indirecto (navegación) y refrigeración industrial. El cambio en el uso futuro está relacionado

directamente con la baja concentración de oxígeno disuelto.

Dyer et al. (2014), citando a Murdoch et al. (2000), Delpla et al. (2009) y Whitehead et al. (2009), indica que el "análisis de los datos históricos sugiere que los cambios en la precipitación, temperatura y la frecuencia y severidad de eventos extremos han marcado efectos sobre los atributos de calidad del agua". Tales señales, sin embargo, son a menudo enmascaradas por los efectos de modificaciones de uso del suelo. La misma Dyer señala que "el esfuerzo está actualmente dirigido a comprender los efectos del uso de la tierra y el cambio climático para predecir las alteraciones en la calidad del agua" (Interlandi y Crockett 2003; Wilson y Weng 2011; Tong et al. 2012).

Tomando como base el párrafo anterior, se indica que los resultados proyectados de calidad del agua no consideran los cambios en el uso de la tierra, que a nuestro parecer es el principal elemento de seguimiento futuro para proyectar los cambios en la calidad del agua. Sin embargo, usa los cambios en la precipitación para estimar los atributos futuros de la calidad del agua.

ESCENARIO 3: EL CAUDAL DISMINUYE UN 14%

Este escenario plantea una interrogante: ¿el caudal ambiental es suficiente para mantener los ecosistemas existentes en el río? Existe una amplia bibliografía que indica que las reducciones en la cantidad del agua ocasionan que la temperatura del agua del río se incremente, lo que resulta en alteraciones de la calidad del agua y la biota acuática (Murdoch et al., 2000, citado por Fiona Dyer et al., 2014).

Dallas y River-Moore (2014) proponen cuatro principios, con el objetivo de minimizar el impacto del cambio

climático en los caudales ambientales, que son:

- Mantener los caudales ambientales apropiados.
- Integrar el cambio climático en la gestión de la calidad del agua.
- Planificar la conservación de la biodiversidad de agua dulce.
- Promover la resiliencia de los ecosistemas.

Los mismos autores señalan que evaluaciones y monitoreos son la clave para identificar los umbrales ecológicos y de vulnerabilidad que pueden ser usados para la toma de decisiones futuras y mejorar la capacidad del pronóstico de estos principios y su aplicación a los caudales ambientales. Además, sostienen que los modelos de cambio climático globales y regionales predicen cambios en las tendencias de la precipitación y la temperatura del aire, e implican modificaciones en la cantidad y la calidad del agua. Estos cambios vulneran los ecosistemas de los ríos y, en ocasiones, empeoran las condiciones existentes.

Los ISQA calculados no permiten visualizar estos cambios para todos los métodos usados para estimar caudales ambientales con excepción del hidrológico -10% del caudal promedio—. La razón por la que no se pueden visualizar podría deberse a los parámetros que usa el ISQA, por lo que se recomienda usar otros índices de calidad del agua para comprobar si las condiciones se mantienen o cambian a los obtenidos para este escenario. El nuevo índice de calidad seleccionado debe incluir otros parámetros y mantener el oxígeno disuelto.

V. CONCLUSIONES

Al estimar los caudales ambientales usando los métodos hidrológicos, hidráulicos y el modelo de hábitat, se reportan cambios en la calidad del agua cuando los caudales se incrementan o disminuyen un 14% debido al cambio climático (escenarios 2 y 3) y el método es el hidrológico -10% del caudal promedio-. Para ambos escenarios y con base en los resultados obtenidos por el estudio, se constata que el oxígeno disuelto reporta concentraciones menores a lo requerido en el ECA agua. Si bien las causas de esta disminución

no pueden ser explicadas por el estudio realizado, sí podemos, al comparar la concentración proyectada con el marco teórico revisado, inferir que el cambio climático podría generar la disminución del oxígeno debido al aumento de la temperatura del agua o una mayor concentración de nutrientes en el agua.

VI. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a Fondo Verde España y a la Universidad Europea de Energía y Medio Ambiente, por otorgarme la beca para la realización de esta investigación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilera G, Pouilly M. Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. En Acta Zoológica Lilloana [Internet]. 2012, Ago. [citado el 10 de ene. de 2014]; 56 (1-2): pp. 15-25. Disponible en: <http://goo.gl/Y6iN1u>
2. Autoridad Nacional del Agua - ANA. Evaluación de los resultados de la calidad del agua en el ámbito de la cuenca del río Rímac. Lima: Dirección de Gestión de la Calidad de los Recurso Hídricos; 2014.
3. Arroyave D, Moreno A et al. Estudio del modelamiento de la calidad del agua del Río Sinú, Colombia. Medellín: Universidad de Medellín; 2013.
4. Chapra S. Surface water-quality modeling. Boston: McGraw-Hill; 1997.
5. Chin D. Water-quality engineering in natural systems. Florida: Wiley-Interscience; 2006.
6. Dallas HF, Rivers-Moore N. Ecological consequences of global climate change for freshwater ecosystems in South Africa. Climate change and freshwater ecosystems [Internet]. 2014. [revisado el 4 de abril 2015]; 110(5/6). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/sajs.2014/20130274>

7. Dyson M. et al. (eds). Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. San José, Costa Rica: UICN-ORMA; 2003.
8. Espejo J. Cálculo de índices de calidad de aguas superficiales y análisis de la red de monitoreo en las cuencas de Huasco, Elqui, Limari y Chopas. La Serena, Chile: Universidad de La Serena; 2010.
9. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente [Internet]. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle; 2004 Oct. Capítulo X, Estudio de la calidad del agua del río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de índices de calidad y contaminación tramo Salvajina-La Virginia; [revisado el 10 de dic. de 2011]; p. 1-158. Disponible en: <http://www.cvc.gov.co/cvc/Mosaic/dpdf2/Volumen10/1-ECARCpag1-158.pdf>
10. Fiona D, Griffiths R, Lucena-Moya P. The effects of climate change on ecologically-relevant flow regime and water quality attributes. *Rev Stoch Environ Res Risk Assess* 2014; 28: 67-82.
11. IUCN [Internet]. Gland: Suiza. Global Environmental Flow Network [revisado el 27 de may. de 2013] Disponible en: <http://www.eflownet.org>
12. Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Ginebra: Suiza. Organización Meteorológica Mundial [revisado el 11 oct. De 2014] Disponible en: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/080.htm.
13. Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Ginebra: Suiza. Organización Meteorológica Mundial [revisado el 20 oct. De 2014] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd50/escenarios/cap2.pdf>
14. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de monitoreo para evaluar la disponibilidad de agua y evolución de los impactos asociados al cambio climático en la parte alta de la cuenca del río Guayllabamba y en las microcuencas Papallacta y Antisana. Quito; 2011.
15. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN. Caudales medios mensuales naturalizados 2003 [Internet]. Lima, 2003 Mar. [Revisado el 20 de may. de 2013]; Disponible en: http://www2.osinerg.gob.pe/procreg/tarifasbarra/ProcNov04-Abril05/pdf/Absoluciones/Anexo%20K_5.pdf
16. Chavimochic.gob.pe, Hidrología del Río Santa [sede Web]. Trujillo: Chavimochic.gob.pe – [actualizado el 1 de agosto de 2015; revisado el 21 de mayo de 2013]. Disponible en: <http://www.chavimochic.gob.pe/portal/wfrmContactanos.aspx>
17. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030 [Internet]. Lima: Ministerio del Ambiente; 2010 [revisado el 22 de nov. de 2013]; Disponible en: http://redpeia.minam.gob.pe/admin/files/item/4d77e7ad5bb27_Resumen_Escenarios_climaticos_del_Peru.pdf.

18. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. Boletín extraordinario de la evaluación hidrológica y pluviométrica en la cuenca amazónica peruana. Documento técnico de las actividades operativas de vigilancia hidrológica de la cuenca Amazónica Peruana. Lima: Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, 2013. Proyecto Hibam-IRD.
19. Vargas P. El cambio climático y sus efectos en el Perú. Lima: Banco Central de Reserva del Perú; 2009.
20. Villanueva J y Alata J. Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería; 2011.
21. WWF. Keeping Rivers Alive. A primer on environmental flows and their assessment [internet]. Londres: O’Keeffe; 2009. [revisado el 24 de noviembre de 2014]. URL disponible en: http://assets.wwf.org.uk/downloads/keeping_rivers_alive.pdf.

RECIBIDO: 12/10/2014
ACEPTADO: 03/12/2014

COAUTOR: MANUEL GONZALES
CORRESPONDENCIA: manuelgonzalesk@yahoo.com