

XXXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MEDELLÍN-COLOMBIA OCTUBRE 01-04 2024

Análisis comparativo de los indicadores de Caudal Ambiental obtenidos de la herramienta HeCCA 1.0

Maria Camila FERNANDEZ BERBEO¹, William Mateo MUNAR MARTINEZ², Nicolas CORTÉS-TORRES³

^{1,2} Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Colombia

email: mcfernandez43@ucatolica.edu.co,

email: wmmunar@ucatolica.edu.co

³ Universitat Politècnica de València, España

email: ncortor@doctor.upv.es

RESUMEN

En el presente documento se presenta la evaluación de cuatro metodologías para estimar el caudal ambiental en Colombia, lo cual es crucial para la gestión de los recursos ambientales y la concesión de licencias para proyectos que impactan los recursos hídricos. Se comparan metodologías tanto nacionales como internacionales (HeCCA 1.0, MAVDT, Smakhtin y Tennant) utilizando el Índice de Alteración del Régimen de Caudales (FRAI por sus siglas en inglés). Se seleccionan cinco cuencas hidrográficas representativas de todo el país para un análisis detallado, caracterizadas por rasgos únicos como la altitud, topografía, actividades económicas y las presiones ambientales en la cuenca. Los resultados obtenidos indican variaciones significativas en los indicadores de alteración, donde la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT en 2004 arrojó los índices de alteración más altos, mientras que la herramienta HeCCA 1.0 mostró los más bajos, con un rango de 1.67 a 2.20 sobre 4, lo que indica una mejor adaptación a las condiciones hidrológicas locales. En consecuencia, se recomienda el uso de HeCCA 1.0 para la estimación del caudal ambiental en Colombia, haciendo énfasis en la necesidad de realizar un análisis holístico que considere todos los componentes interactuantes dentro de los cuerpos de agua para lograr resultados más precisos y realistas.

INTRODUCCIÓN

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, el Caudal Ambiental (CA) no se entiende como un valor constante en el tiempo, ni como un régimen de caudales mínimos, sino como *"el volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de calidad y cantidad, necesario para mantener el funcionamiento y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos"* (MADS, 2013). De esta manera, el caudal ambiental influye directamente en los servicios ecosistémicos de una cuenca hidrográfica, especialmente en términos de provisión, regulación y soporte. A la luz del cambio y la variabilidad climática en curso en Colombia, es imperativo dotar a los tomadores de decisiones de herramientas que faciliten la definición de los requerimientos de caudal ambiental y que presenten una visión confiable de las condiciones de disponibilidad de agua en escenarios futuros (DNP, 2013).

En los últimos 20 años, se han propuesto diferentes enfoques hidrológicos para la estimación del caudal ambiental (Richter et al., 2012), como la Herramienta para el Cálculo del Caudal Ambiental en Colombia - HeCCA 1.0 (Cortés-Torres et al., 2019), que se ha puesto a disposición de los tomadores de decisiones desde 2017 (MADS, 2017). La herramienta HeCCA 1.0 emplea la propuesta metodológica actual para la gestión del Río Bogotá (Gomez-Diaz et al., 2023) a través del procesamiento cuantitativo de datos de caudal registrados en cada zona de interés.

Además, las circunstancias bajo las cuales es posible la estimación del caudal ambiental varían de región a región, debido a las diferentes características topográficas. Por lo tanto, si no se tienen en cuenta los diversos componentes que influyen en la dinámica de las cuencas, no es posible obtener información confiable. Dada esta significativa variabilidad en las condiciones, es crucial que el desempeño y la calidad de las metodologías implementadas sea alto, de modo que sean aplicables bajo diferentes condiciones de régimen hidrológico y también comparables con metodologías utilizadas a nivel internacional.

Aunque algunas propuestas de CA pueden comportarse de manera óptima en ciertos escenarios (Dong et al., 2012), investigaciones previas muestran que la selección de la metodología más adecuada depende principalmente de la sensibilidad de los resultados obtenidos. Dependiendo del método seleccionado, la metodología de CA propuesta puede volverse insostenible y afectar directamente el área de estudio. Por ejemplo, Karimi et al. (2021) estimaron el caudal ambiental en el río Zohreh, ubicado en el suroeste de Irán, donde encontraron que cada método varía en complejidad y tiempo requerido para el procesamiento de datos.

De manera similar, en 2018 se descubrió que, dependiendo de la metodología utilizada para la estimación del CA en el río Krishna (Kumar & Jayajumar, 2018), se produce una alteración en el régimen durante la temporada de altos caudales. La investigación citada anteriormente propone un análisis de la variación entre metodologías, comenzando con una comparación de variables estadísticas, cuyo hallazgo es que los indicadores de alteración hidrológica proporcionan una evaluación de las condiciones mínimas de caudal necesarias para la intervención hidroeléctrica.

Otro estudio de caso sobre la evaluación de estrategias de CA es el estudio del río Birris en Costa Rica (Guzman-Arias et al., 2019). El objetivo principal de la investigación es identificar el régimen de caudal en la cuenca del río, así como el grado de alteración obtenido a través de diferentes metodologías propuestas a nivel nacional. A pesar de que los resultados indican el grado de alteración en el río, el alcance de la investigación no permitió identificar el nivel de restricción para cada uno de los procedimientos de caudal ambiental utilizados.

Además, en Colombia se llevó a cabo la investigación del CA del río Chinchiná (Boodoo et al., 2014), que tiene como objetivo analizar el impacto producido por la implementación de diferentes metodologías de caudal ambiental de referencia a nivel nacional e internacional en la cuenca del río Chinchiná, e identificar su influencia en la producción hidroeléctrica. Este estudio sirve como referencia para comparar los métodos propuestos por las entidades gubernamentales nacionales, al identificar la aplicabilidad y las variaciones entre los métodos.

Los hallazgos de los estudios mencionados proporcionan una línea base que ofrece herramientas útiles para la evaluación del CA en Colombia. Por lo tanto, es de interés evaluar los resultados obtenidos con la herramienta HeCCA 1.0, analizando cómo varían los caudales ambientales cuando se comparan con metodologías implementadas a nivel internacional, por medio de los Indicadores de Alteración Hidrológica - IHA (The Nature Conservancy, 2023), que permiten comparar los impactos de las actividades humanas y su relación con el caudal ambiental.

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la variación en los indicadores de alteración hidrológica aplicados a diferentes metodologías para la evaluación del Caudal Ambiental utilizadas a nivel nacional e internacional, en comparación con la Herramienta para el Cálculo del Caudal Ambiental - HeCCA 1.0. Para lograr esto, se lleva a cabo un procesamiento y análisis cuantitativo de los registros de caudal medio diario para cada área de estudio.

La investigación se basa en un estudio de caso de cinco cuencas hidrográficas, representando cada una de las áreas hidrográficas en Colombia y mostrando diversas condiciones en términos de tamaño, área, régimen de precipitación, pendiente, presiones antrópicas y actividades económicas. Además, se tiene en cuenta la disponibilidad de datos y estudios previos realizados en Colombia para caudales medios diarios entre 1984 y 2014, con el objetivo de representar diversas condiciones hidrológicas en todo el país, con cuencas hidrográficas de diferentes morfometrías y regímenes de caudal (Fernandez-Berbero et al., 2021). Posteriormente, se aplica cada etapa de la metodología, culminando en la evaluación de la variación del caudal ambiental bajo diferentes metodologías. La metodología cuenta con tres etapas descritas a continuación.

1. Estimación del caudal ambiental con HeCCA 1.0

Partiendo del área de estudio definida, la información disponible de las estaciones climatológicas se obtiene del geoportal proporcionado por sistemas de información como el IDEAM (<http://www.ideam.gov.co/geoportal>). Posteriormente, las series de datos de caudal obtenidas se procesan utilizando la Herramienta para el Cálculo del Caudal Ambiental en Colombia, HeCCA 1.0.

La herramienta HeCCA 1.0 se deriva de la metodología propuesta por el Ministerio Nacional de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS en 2018 (MADS, 2017) desde un aspecto hidrológico. La metodología desarrolla un enfoque holístico para la estimación del caudal ambiental (Richter et al., 2012), abarcando los componentes hidrológico, geomorfológico, hidráulico, de calidad del agua, ecológico y de servicios ecosistémicos. La metodología establece requisitos mínimos de datos, criterios para la delimitación del área de estudio y alcances específicos de aplicación, dependiendo de la escala de trabajo. Además, las directrices metodológicas incorporan elementos de análisis sobre la variabilidad climática, evaluación y monitoreo de los caudales ambientales, enfatizando su importancia para la restauración de ecosistemas acuáticos degradados.

HeCCA 1.0 proporciona propuestas de porcentaje de utilización mensual para cada estación climatológica con registros de caudales medios diarios (m^3/s), junto con series sintéticas de caudales ambientales a escala temporal diaria. Después de obtener las series sintéticas de caudales ambientales obtenidas de HeCCA 1.0, estas se ingresan junto con las series de caudal de las bases de datos del IDEAM en el software IHA desarrollado por The Nature Conservancy (The Nature Conservancy - TNC, 2023). Como resultado, se derivan 33 indicadores que evalúan la alteración de las series de caudal en relación con el caudal ambiental, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de parámetros IHA (TNC, 2023)

Grupo de parámetros	Parámetros hidrológicos	Número de parámetros
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la media o la mediana para cada mes calendario	12
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Mínimos anuales, media de 1 día Mínimos anuales, medias de 3 días Mínimos anuales, medias de 7 días Mínimos anuales, medias de 30 días Mínimos anuales, medias de 90 días Máximos anuales, media de 1 día Máximos anuales, medias de 3 días Máximos anuales, medias de 7 días Máximos anuales, medias de 30 días Máximos anuales, medias de 90 días Cantidad de días con caudal cero Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual	12
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día	2
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días) Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días)	4
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos Cantidad de inversiones hidrológicas	3
Total		33 parámetros

2. Metodologías de referencia de Caudal ambiental

En esta etapa, se determina el caudal ambiental obtenido a través de diferentes propuestas metodológicas: 1) la propuesta del MAVDT – 2004 (CRA, 2024), 2) Smakhtin (Smakhtin et al., 2004), y 3) Tennant (Karimi et al., 2021), las cuales, según la revisión de literatura realizada, sirven como referencias a nivel nacional e internacional. Este procesamiento permite obtener valores de CA que varían según la escala de trabajo de cada metodología. Para los propósitos del estudio, los resultados de todos los métodos se reajustan a un nivel diario.

Luego, todos los valores de caudal ambiental obtenidos se procesan en el software IHA, lo que da como resultado índices de alteración para los diversos escenarios.

2.1 Metodología de Tennant

Propuesto en 1976, el Método Tennant se utiliza para estimar el caudal necesario para el hábitat de los peces en un cuerpo de agua (Santacruz de Leon & Aguilar-Robledo, 2009), (Karimi et al., 2021). Este método emplea el caudal medio anual para estimar el caudal ambiental basándose en parámetros ecológicos y condiciones del río. Ampliamente utilizada en países en desarrollo, la metodología de Tennant tiene un enfoque hidrológico conocido por su facilidad de aplicación, bajo costo y requerimientos mínimos de recursos, ya que solo depende de datos de estaciones hidrométricas. Sirve como una aproximación inicial, proporcionando valores de caudal ambiental para períodos de seis meses (lluvia-estiaje).

2.2 Metodología de Smakhtin

En este método, el caudal ambiental se basa en el concepto de Requerimiento de Agua Ambiental (EWR, por sus siglas en inglés), que consta de dos componentes: el Requerimiento de Caudal Alto (HFR) y el Requerimiento de Caudal Bajo (LFR) (Karimi et al., 2021). El HFR es el caudal que se presenta en las inundaciones, el cual impacta la forma del río, así como el ecosistema en las áreas inundadas. El valor del LFR representa la cantidad mínima de agua necesaria para satisfacer los requerimientos de recursos para el sustento de los peces y otras especies acuáticas; en otras palabras, el caudal ambiental (Smakhtin et al., 2004).

2.3 Metodología MAVDT

La metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial surge de la Resolución 865 de 2004, que adopta la metodología para calcular el índice de escasez para aguas superficiales (CRA, 2004). Este documento representa uno de los enfoques iniciales para el caudal ambiental en Colombia, definiéndolo como un valor anual único. El índice de escasez está relacionado con la reducción de la calidad del agua debido a vertimientos, escorrentías agrícolas, lluvias cargadas de químicos y la extracción de agua por actividades mineras. Por lo tanto, se define que se debe aplicar un descuento del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo del río en estudio.

3. Alteración hidrológica

Uno de los mecanismos más utilizados para comparar los indicadores de alteración del caudal es el software de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA), desarrollado por The Nature Conservancy (Kumar & Jayakumar, 2018). IHA proporciona información valiosa para comprender los impactos de las actividades humanas en los recursos hídricos, al evaluar 33 indicadores hidrológicamente relevantes para el caudal ambiental, derivados de datos hidrológicos a escala diaria (Tabla 1).

Para comparar el grado de alteración entre diferentes metodologías, se cuantifica el Índice de Componentes del Caudal (Flow Component Index - FCI) (Boodoo et al., 2014). El FCI se calcula para cada grupo de componentes de los índices de alteración hidrológica en función del grado de alteración post-impacto (Ec. 1). Considerando que algunos parámetros pueden ser más sensibles que otros, los parámetros se dividen en cinco clases según su impacto (p) de 0 a 4, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Impacto de los parámetros

Significancia	Impacto (p)
Nula o baja (0-9.99%)	0
Moderada (10-19.99%)	1
Media (20-49.99%)	2
Alta (50-99.99%)	3
Crítica (>100%)	4

Una vez conocido el valor de impacto (p), se calcula el FCI para cada grupo de indicadores de alteración "x". El valor del FCI para cada grupo se calcula como se indica en la Ec. 2; en esta expresión, se asigna un peso ponderado (w) a cada componente, que luego se multiplica por el valor de p obtenido. Al ponderar los valores de p para cada componente, se obtiene el FCI. La suma del FCI para todos los grupos de indicadores corresponde al valor del Índice de Alteración del Régimen de Caudal (FRAI por sus siglas en inglés) según la Ec. 3.

$$\text{Grado de alteración} = \frac{\text{valor post impacto} - \text{valor pre impacto}}{\text{valor pre impact}} \quad (1)$$

$$FCI_x = CW_x * \sum(p1 * w1 \dots pn * wn) \quad (2)$$

$$FRAI = \sum[FCI_1 + FCI_2 + \dots + FCI_n] \quad (3)$$

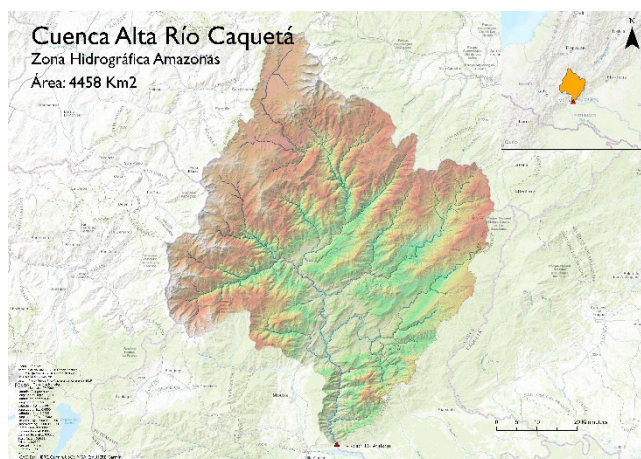
Para cada metodología de caudal ambiental aplicada, se obtiene un valor de FRAI, el cual es útil para comparar y evaluar el impacto de las alteraciones en cuerpos de agua y su disponibilidad.

ESTUDIO DE CASO

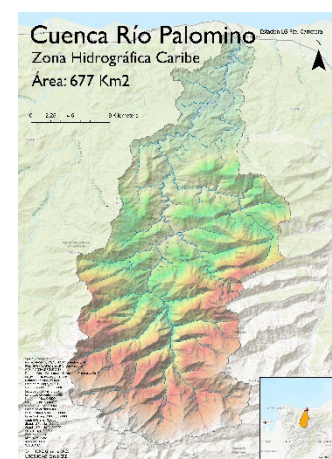
El área de estudio se centra en un conjunto de cuencas hidrográficas que representan las diversas condiciones hidrológicas de Colombia, con diferentes morfometrías y regímenes de caudal, cada una ubicada dentro de un área hidrográfica de Colombia (Fig. 1, Tabla 3) con tamaños que varían entre 423 y 2933 km². Las áreas de estudio propuestas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de las cuencas hidrográficas estudiadas

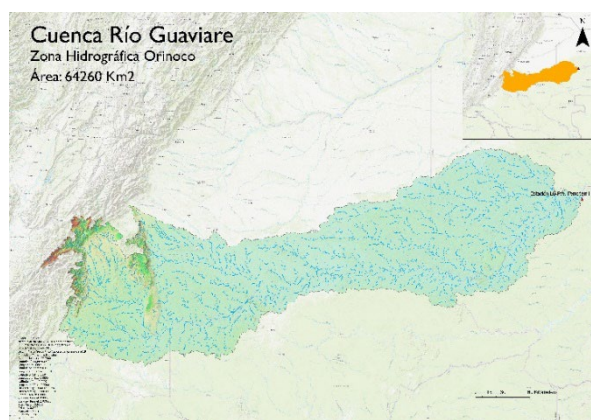
Estación IDEAM	Río	Área Hidrográfica	Área (Km²)
Puente Carretera	Río Palomino	Caribe	684.71
Pilispi	Río Guabo	Pacífico	423.2
Puente Ferrocarril	Río Opón	Magdalena-Cauca	1743.89
Andaqui	Alto Río Caquetá	Amazonas	520.6
Barranco murciélago	Río Guaviare	Orinoco	2933.7



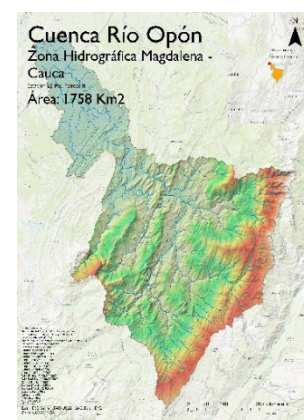
a) Cuenca alta Río Caquetá (Estación Andaqui)



b) Cuenca Río Palomino (Estación Pte. Carretera)



c) Cuenca Río Guaviare (Estación Barranco Murciélago)



d) Cuenca Río Opón (Estación Pte. Ferrocarril)

En cuanto a la cuenca del río Opón, su régimen de caudales es bimodal, con altos caudales entre abril y junio, y nuevamente entre septiembre y noviembre, mientras que los caudales medios se mantienen entre 39 y 143 m³/s.

2. Comparación de caudal ambiental

La comparación de los valores obtenidos para la cuenca del río Caquetá revela dos comportamientos distintos. Un enfoque tiende a estimar caudales ambientales muy bajos que no consideran las condiciones de conservación de la cuenca, como es el caso del método MAVDT, que arroja un caudal ambiental promedio de 64.97 m³/s. También se observa que la metodología de Tennant se aplica a cuencas con características climáticas específicas, considerando dos valores únicos por año, correspondientes a 41.49 y 124.76 m³/s, respectivamente.

Para la cuenca del río Palomino, hasta el punto de cierre en la estación Pte. Carretera, se observa que los valores más bajos de caudal ambiental corresponden a los obtenidos mediante las metodologías MAVDT y Tennant, indicando enfoques menos restrictivos en términos de utilización del caudal, con valores que varían entre 2 y 3.2 m³/s para la metodología MAVDT, y entre 2 y 7.48 m³/s para la metodología Tennant. Por otro lado, las metodologías Smakhtin y HeCCA proponen valores de caudal ambiental más altos, lo que requiere un menor nivel de intervención antrópica en la cuenca.

En la cuenca del río Opón, que representa la cuenca Magdalena-Cauca, se observa que las metodologías que proponen una mayor restricción en el uso de los recursos son HeCCA (3 – 499.36 m³/s) y Smakhtin (3 – 290.36 m³/s). En contraste, las propuestas de MAVDT y Tennant presentan valores de caudal ambiental más bajos, que también son constantes en el tiempo. En relación con estos resultados, se puede inferir que la cuenca es altamente variable en términos de caudal, ya que hay eventos extremos tanto altos como bajos, con inundaciones de corta duración, especialmente en la cuenca alta con pendientes más pronunciadas, y eventos de inundación de larga duración en la cuenca baja, caracterizada por cuerpos de agua pantanosos y un relieve predominantemente plano, permitiendo una baja duración de las inundaciones.

Los resultados de caudal ambiental obtenidos para la cuenca del río Guaviare muestran que la metodología que estima valores más bajos, bajo una condición de alta utilización, es la propuesta por el MAVDT, correspondiente a 159.19 m³/s. Tennant propone un valor fijo para toda la serie temporal basado en condiciones de caudal alto o bajo; sin embargo, no considera la ocurrencia de eventos extremos en temporadas específicas de la serie.

En contraste, las propuestas de HeCCA y Smakhtin pueden considerarse más "conservadoras," ya que buscan preservar el cuerpo de agua y mantener las condiciones del ecosistema, con actividades que aseguren que no haya alteración del río. Se observa que la propuesta de Smakhtin presenta los valores más altos (entre 265.3 y 7403.2), seguida por HeCCA, que propone caudales ambientales que se ajustan a la serie de caudales registrada, variando entre 265 y 7538 m³/s.

Una comparación de las metodologías empleadas para la estación del río Guabo, así como en las otras cuencas hidrográficas, revela que la metodología MAVDT presenta un valor fijo en el tiempo correspondiente a 2.47 m³/s, que no tiene en cuenta las variables hidrológicas de la cuenca. Por otro lado, las propuestas de Tennant y Smakhtin sugieren valores de caudal ambiental más altos, que en ciertos casos igualan el valor del caudal medio diario, indicando un alto grado de conservación para prevenir la extracción de recursos para utilización. Finalmente, el caudal obtenido a través de la herramienta HeCCA fluctúa en el tiempo, ajustándose a las condiciones diarias de la serie de caudales, permitiendo un mayor grado de conservación y optimización en la utilización del caudal. Los valores estimados de caudal ambiental con HeCCA varían entre 3.60 y 107.85 m³/s.

3. FRAI y FCI para comparación de HeCCA 1.0

Los resultados demuestran que, aparte de la herramienta HeCCA, las metodologías restantes no consideran la ocurrencia de eventos máximos. En consecuencia, están limitadas a establecer umbrales promedio para toda la serie de datos. Esta característica permite la optimización en la utilización del caudal con HeCCA, que se adapta más eficazmente a las condiciones de variabilidad y eventos de alta magnitud en la cuenca. La principal diferencia entre la metodología HeCCA y las otras, radica en que HeCCA proporciona un margen de caudal utilizable que nunca iguala ni excede el caudal medio diario del cuerpo de agua. En contraste, las otras metodologías proponen caudales ambientales que garantizan la conectividad del río, pero no siguen la dinámica de la variabilidad temporal.

Como se observa en la Tabla 4, es importante considerar que los valores de los indicadores de alteración FRAI para el caso "fair" en la metodología propuesta por Smakhtin representan una serie de caudales no alterada, ya que se utiliza el valor Q90 de la curva de duración de caudales. Sin embargo, esta condición, aunque proporciona un régimen de caudal ambiental, no refleja con precisión las condiciones reales. En escenarios de utilización, no es factible extraer el 100% del caudal medio diario de un río, lo que podría llevar a obtener índices bajos de FCI y FRAI, lo cual no sería aconsejable para análisis posteriores.

Tabla 4. Valores de FRAI obtenidos para las estaciones de estudio

	MAVDT	Tennant - severe	Tennant - poor	Tennant - Fair	Tennant - good	Tennant - Excellent	Tennant - outstanding	Tennant - optimum	Tennant - flushing	Smakhtin - Natural	Smakhtin - Good	Smakhtin - Fair	HeCCA
Andaqui	3.22	3.12	3.12	2.61	2.61	2.75	2.28	2.15	2.61	2.00	1.46	1.26	1.67
Carretera	3.35	3.52	3.22	2.84	2.84	2.81	2.56	2.30	2.84	2.31	1.84	1.39	2.11
Ferrocarril	3.07	3.17	3.12	3.07	3.07	2.57	2.40	2.31	3.07	2.18	1.63	1.18	1.97
Murciélago	3.52	3.52	3.16	3.16	3.16	1.90	1.82	1.59	3.16	1.32	0.80	0.13	2.20
Pilispi	3.52	3.52	3.52	2.93	2.93	2.70	2.23	2.08	2.93	1.93	1.46	0.96	2.00

Como se muestra en la Fig. 2, para la metodología MAVDT se observan altos grados de alteración para las estaciones en las cuencas del Caribe, Magdalena-Cauca y Amazonas. Se notan índices más bajos para las cuencas del Caribe y del Pacífico. Por otro lado, la propuesta de Tennant muestra altas variaciones dependiendo del nivel de conservación, especialmente para las condiciones de conservación baja, buena y excelente. Esto sugiere que las condiciones iniciales no se están manteniendo y están ocurriendo condiciones de caudal alteradas.

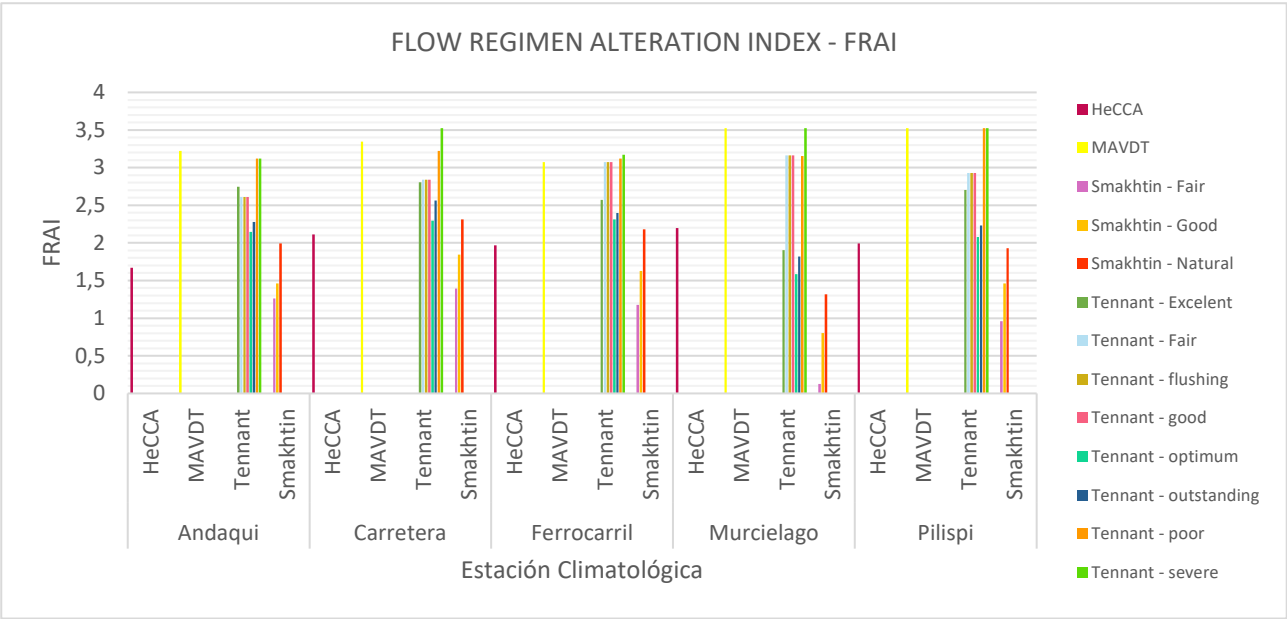


Figura. 2. Valores de FRAI para las estaciones de estudio

En cuanto a la metodología de Smakhtin, aunque se obtienen valores bajos para los índices de alteración, estos no se consideran representativos ya que la serie de caudales ambientales replica los valores de la serie histórica de caudales. Esto se debe a los altos umbrales definidos por la metodología.

Respecto a la metodología Tennant, es notable que estudios previos han demostrado su aplicabilidad en cuencas con pendientes menores al 1%. Para pendientes más pronunciadas, el método debe usarse con cautela y puede no ser adecuado para la formulación de programas de protección de ríos. Además, tiene limitaciones para su uso en programas de rehabilitación y recuperación de ríos.

Los resultados obtenidos para la herramienta HeCCA indican que la metodología propone un nivel moderado de alteración (Tabla 4), con valores que oscilan entre 1.67 y 2.20 sobre 4 para todas las condiciones. Se observa

que la cuenca del río Caquetá (Andaqui) exhibe la alteración más favorable del régimen de caudal, mientras que la cuenca del río Guaviare (Pte. Ferrocarril) muestra los niveles más altos de alteración. Para la metodología MADS, se observó la variación hidrológica mensual del caudal ambiental con respecto a la serie no alterada, revelando que las mayores variaciones ocurrieron durante los meses de caudal máximo en las estaciones de las regiones Amazonas y Pacífico. En cambio, en las estaciones de las áreas hidrográficas del Caribe y Orinoco se observaron las menores variaciones durante los meses de caudal máximo. En la cuenca Magdalena-Cauca, no se observaron tendencias de comportamiento. Por lo tanto, se puede concluir que los índices de HeCCA están arrojando los valores más bajos, al mantener la ocurrencia de eventos tanto altos como bajos, así como los fenómenos de variabilidad en el tiempo. En consecuencia, HeCCA se considera como la metodología que mejor se alinea con las condiciones observadas en todas las estaciones estudiadas.

CONCLUSIONES

El índice FRAI propuesto facilita la comparación de las metodologías implementadas en términos de su impacto y nivel de alteración. Un aspecto crucial de la metodología utilizada es que asigna el mismo peso a cada grupo de componentes hidrológicos, así como a cada indicador dentro de cada grupo. Sin embargo, estas proporciones pueden ajustarse de acuerdo con la importancia relativa de cada componente de alteración en cada cuenca, requiriendo un análisis detallado y una comprensión profunda de las características específicas de cada área.

Es importante resaltar que todas las metodologías evaluadas en este estudio muestran índices de alteración del caudal altos. Esto subraya la necesidad de investigaciones holísticas que consideren los impactos negativos en aspectos ecosistémicos, ecológicos e hidrológicos que pueden surgir de la explotación de los recursos hídricos. Las metodologías para estimar el caudal ambiental pueden aplicarse en escenarios controlados donde los ecosistemas están bien entendidos, gestionados y con un bajo grado de amenaza.

Las diferencias marcadas entre las metodologías aplicadas reflejan los distintos niveles de restricción definidos por diversos autores y autoridades ambientales para los cuerpos de agua. Los niveles de intervención antrópica tienden a aumentar con el tiempo, lo cual requiere que sean implementadas metodologías más conservacionistas para garantizar la conectividad a largo plazo de los flujos naturales.

La literatura existente indica que es ventajoso utilizar más de una metodología simultáneamente para estimar el caudal ambiental en un río. De esta manera, es posible seleccionar el método que mejor se adapte al área de estudio en función de los resultados obtenidos. Además, la metodología elegida debe tener en cuenta los niveles de protección del ecosistema del río, utilizando datos disponibles sobre las condiciones bióticas, socioeconómicas y ambientales.

En las cuencas estudiadas, no existe un análisis exhaustivo de la caracterización del ecosistema, sus necesidades y los impactos de las alteraciones del caudal en las especies acuáticas y sus hábitats. Esto lleva a una subestimación de los indicadores de alteración y de los niveles de caudal requeridos para mantener ecosistemas específicos. Por lo tanto, los estudios enfocados en condiciones socioeconómicas y ambientales pueden ser muy beneficiosos para determinar caudales ambientales ajustados que permitan una toma de decisiones basada en necesidades de sostenibilidad ecológica y económica.

Considerando las características y actividades económicas desarrolladas alrededor de los cuerpos de agua en Colombia, proporcionar una herramienta confiable para estimar el caudal ambiental se convierte en un factor diferenciador para los tomadores de decisiones, especialmente para el sector de generación de energía. Este estudio representa un primer enfoque para evaluar el desempeño de las regulaciones aplicables en Colombia.

La herramienta HeCCA representa una contribución al espectro de soluciones para estimar el caudal ambiental. Aunque existen numerosas soluciones basadas en software, es importante destacar la relevancia de HeCCA, ya que ha sido desarrollada específicamente para Colombia, teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas de las diversas áreas hidrográficas del país. Este desarrollo permite la inclusión de diferentes componentes de la metodología propuesta para Colombia, avanzando hacia una solución holística que considera todo el sistema fluvial.

Referencias

Boodoo, K. S., McClain, M. E., Vélez Upegui, J. J., & Ocampo López, O. L. (2014). Impacts of implementation of Colombian environmental flow methodologies on the flow regime and hydropower

production of the Chinchiná River, Colombia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(4), 267–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.07.001>

Cortés-Torres, N., Laverde Mesa, L., Fernández Berbeo, M. C., Ortega Tenjo, K., & Salazar Galan, S. (2019, November). Herramienta para el cálculo del caudal ambiental en Colombia – HeCCA. Versión 1.0. Manual de Usuario. Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. https://drive.google.com/file/d/19xRwkPmdjR4PYd8hqhAh17uOEN5jHyVV/view?usp=share_link

Departamento Nacional de Planeación - DNP. (n.d.-a). Documentos CONPES. Retrieved October 1, 2023, from <https://2022.dnp.gov.co:443/CONPES/documentos-conpes>

Dong, Z.-H., Yang, X.-H., Guo, Y.-N., Mei, Y., Li, Y.-Q., & Li, J.-Q. (2012). Modified Frequency Computation Method for Optimal Environmental Flows. *THERMAL SCIENCE*, 16(5), 1539–1543. <https://doi.org/10.2298/TSCI1205539D>

Fernández Berbeo, M. C., Cortes Torres, N., Ortega Tenjo, K., Perez Pedraza, M., Laverde Mesa, L., Cubillos Peña, C., & Salazar Galan, S. (2021). Testing the environmental flow allocation requirements in Colombia through the HeCCA 1.0 tool (EGU21-13769). EGU21. Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13769>

Gestor Normativo de la CRA - Resolución 865 de 2004 MAVDT. (n.d.). Retrieved May 8, 2024, from https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minambientevdt_0865_2004.htm

Gómez-Díaz, M. A., Rondón-Díaz, J. D., & Robayo-Gutiérrez, W. S. (2016). Cálculo del caudal ambiental mediante una metodología holística en la cuenca alta del río Bogotá. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/c4605e70-a512-4147-8f08-dfec3e077c97>

Guzman-Arias, I., Watson, F., & Villagra-Mendoza, K. (2019). Determination of Environmental Flow of the Birris River, Costa Rica. *TECNOLOGIA EN MARCHA*, 32(4), 18–27. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4786>

Karimi, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K., & Heydari, M. (2021). Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve. *Acta Geophysica*, 69(1), 285–293. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00539-z>

Kumar, A. U., & Jayakumar, K. V. (2018). Assessment of environmental flows using hydrological methods for Krishna River, India. *Advances in Environmental Research*, 7(3), Article 3.

Martínez, L. F. S., & Malaver, R. G. V. (2020). Estado del recurso hídrico en la cuenca del río Bogotá, en términos de calidad y cantidad. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2013). Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental.

Resolución “Por la cual se adopta la Guía metodológica para la estimación del caudal ambiental en Colombia y se dictan otras disposiciones” (2017). <https://www.minambiente.gov.co/consulta/resolucion-por-la-cual-se-adopta-la-guia-metodologica-para-la-estimacion-del-caudal-ambiental-en-colombia-y-se-dictan-otras-disposiciones/>

Richter, B. D., Davis, M. M., Apse, C., & Konrad, C. (2012). A Presumptive Standard for Environmental Flow Protection. *River Research and Applications*, 28(8), 1312–1321. <https://doi.org/10.1002/rra.1511>

Santacruz de León, G., & Aguilar-Robledo, M. (2009). Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica*, 19(1), 25–32.

Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity. *Water International*, 29(3), 307–317. <https://doi.org/10.1080/02508060408691785>

The Nature Conservancy. (n.d.-b). Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) [Computer software]. Retrieved October 1, 2023, from <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofhydrologicAlteration/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx>