

Estimación del caudal ecológico de la cuenca binacional del río Bravo/Grande mediante el contraste de modelos hidrológicos.

Guerra-Cobián, V. H.^a, Ferriño-Fierro, A. L.^b, Cavazos-González, R. A.^c, Palomo-Mendoza, J. C.^d, Yépez-Rincón, F. D.^a

^{a,b,c,d} Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. Av. Universidad s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México, C.P 66455. ^a Centro Internacional del Agua, victor.guerracb@uanl.edu.mx. ^b Instituto de Ingeniería Civil, adrian.ferrinofr@uanl.edu.mx, ^c Facultad de Ingeniería Civil, ricardo.cavaszgzz@uanl.edu.mx, ^d Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, cpalomomendoza@live.com.

Línea temática M | Tema monográfico.

RESUMEN

El presente trabajo se enfocó en realizar la estimación del caudal ecológico mediante el contraste de resultados de los métodos hidrológicos mencionados en la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. Específicamente, el proyecto se centró en el río Bravo/Grande que es límite y frontera natural entre Estados Unidos de América (EE.UU.) y México (figura 1), partiendo de la zona comprendida entre Ciudad Juárez Chihuahua, México y la ciudad de El Paso Texas, EE.UU. hasta su desembocadura en la Ciudad de Matamoros Tamaulipas, México y La ciudad de Brownsville, Texas en EE.UU. Para el estudio se consideraron 37 estaciones hidrométricas de las 73 sobre el lecho del río Bravo/Grande y sus principales afluentes. Los resultados muestran que los comportamientos de los regímenes de caudales ecológicos son en forma de incremento, de aguas arriba hacia aguas abajo. Se logró obtener un régimen de caudal ecológico para los tramos en que se dividió el río. Asimismo, se tiene la estimación de 3 propuestas para los tramos conformados por las 3 clases de estaciones hidrométricas para el régimen de caudal ecológico para el río Bravo en el tramo completo de estudio.

Palabras clave | Caudal ecológico; río Bravo/Grande; cuenca binacional; modelos hidrológicos.

INTRODUCCIÓN

Hasta ahora la principal preocupación de las instituciones que administran el agua es reunirla y manejarla solo para satisfacer las necesidades humanas dejando por un lado las exigencias ambientales. Esto ha provocado en algunos lugares consecuencias trágicas en las que el medio ambiente ha sufrido modificaciones difíciles de revertir o en algunos casos de carácter irreversible (Ortiz, 2008). En este contexto, el caudal ecológico es aquel caudal que se debe dejar fluir en un cauce para mantener las funciones y dinámicas ecológicas de las diferentes comunidades bióticas después de un aprovechamiento hídrico (Palau, 1994; Bustamante et al, 2007). Este caudal no debe ser un valor único para todo el año, sino un régimen hidrológico en la corriente que garantice la sostenibilidad y productividad de largo plazo de los ecosistemas fluviales y sus ambientes ribereños (Naiman, 1997).

Por otra parte, para determinar el régimen de caudal ecológico se han desarrollado, a nivel internacional, gran cantidad de metodologías. Éstas se clasifican por la forma en que se aproximan o abordan al problema. El reto en la actualidad es, cómo elegir el método más adecuado y esto depende de que cumplan con los principios o fundamentos actualmente válidos (DOF, 2012). A nivel mundial, de manera más analítica para la estimación del caudal ecológico, inicialmente surgieron las metodologías denominada Modelos Hidrológicos basadas en datos hidrológicos sobre registros diarios, mensuales y anuales, o cualquier combinación entre estos, de caudal. Después se desarrollaron los Métodos Hidráulicos y de Simulación del Hábitat, que relacionan la calidad y cantidad de una corriente estudiando los efectos del incremento de la descarga sobre el hábitat de una especie objetivo de importancia económica. Por último, surgieron los Métodos Holísticos; dentro de los cuales se consideran

diversas variables más que en los anteriores métodos. En estos se consideran factores bióticos y abióticos que constituyen al ecosistema en cuestión incluyendo la participación de una gran diversidad de disciplinas y su conocimiento (Martínez, 2012).

El caudal ecológico representa un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos como un proceso que promueve el desarrollo y el manejo coordinado del agua, para con esto lograr maximizar el bienestar económico y social de una manera equitativa y sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas asociados al cauce. Para hacerle frente a esta creciente necesidad e interés en la determinación de caudales ecológicos para la conservación de los ecosistemas convergentes a los ríos, en México se han realizado distintos esfuerzos, tanto en la difusión técnica y la aplicación de metodologías, como en su intento de regularlo mediante el marco legal (Barrios et al, 2011). Algunas de estas investigaciones han derivado en la publicación, en el Diario Oficial de la Federación (DOF), de la declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana: MX-AA-159-SCFI-2012 el 20 de septiembre de 2012, la cual “Establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas”. Manifestándose que este tema es relativamente nuevo para las instituciones gubernamentales encargadas de la gestión del agua en nuestro país. La definición de caudal ecológico según esta norma es la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales (DOF, 2012).

De acuerdo con la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre Estados Unidos y México (CILA), actualmente no hay algún estudio de estas características en este cuerpo de agua (CILA, 2017), aún y cuando en la reunión binacional organizada por Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés) en 2008 en Texas, donde participaron 20 organizaciones académicas, gubernamentales y de la sociedad civil; se plasmó entre las visiones la de conservar los hábitats dependientes del río Bravo/Grande (Von Der Meden et al., 2011). Además, el valle del bajo río Bravo/Grande es considerado una de las regiones más diversas en términos de biodiversidad en el mundo (OAS, 2013).

El presente trabajo se enfocó en realizar la estimación del caudal ecológico mediante el contraste de resultados de los métodos hidrológicos mencionados en la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. Específicamente, el estudio se centró en el río Bravo/Grande que es límite y frontera natural entre Estados Unidos de América (EE.UU.) y México.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El río Bravo/Grande es considerado como el quinto río más largo de Norteamérica y el vigésimo cuarto río más grande del mundo, cuenta con una longitud de aproximada de 3000 kilómetros. Tiene su origen a partir de la unión de varios arroyos en la parte inferior de la montaña Canby en el Bosque Nacional del Río Grande, Colorado. Fluye hacia el este y después hacia el sur, a través del estado de Nuevo México. En el extremo occidental de Texas, el río toma otro rumbo y se mueve hacia el este, en medio de los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila, Tamaulipas y Nuevo León, y el estado de Texas. A lo largo de este recorrido pasa por ciudades como: El Paso, Ciudad Juárez, Laredo, Nuevo Laredo, McAllen, Reynosa y desemboca al Atlántico a la altura de la ciudad de Matamoros, Tamaulipas, México (Figura 1). La cuenca del río abarca unos 471900 km² y drena una región que es árida en más del 30 por ciento. Cerca de la mitad de la cuenca se localiza en Estados Unidos de América, y la otra mitad en México.

El valle del Río Bravo es considerado una de las regiones con mayor biodiversidad en el mundo, con millones de pájaros migratorios que la visitan para alimentar y descansar ahí durante la migración estacional (OAS, 2013). Entre la rica diversidad nativa de esta región se incluyen 333 especies de aves, 23 especies de peces y 76 especies de reptiles y anfibios (WWF, 2015).

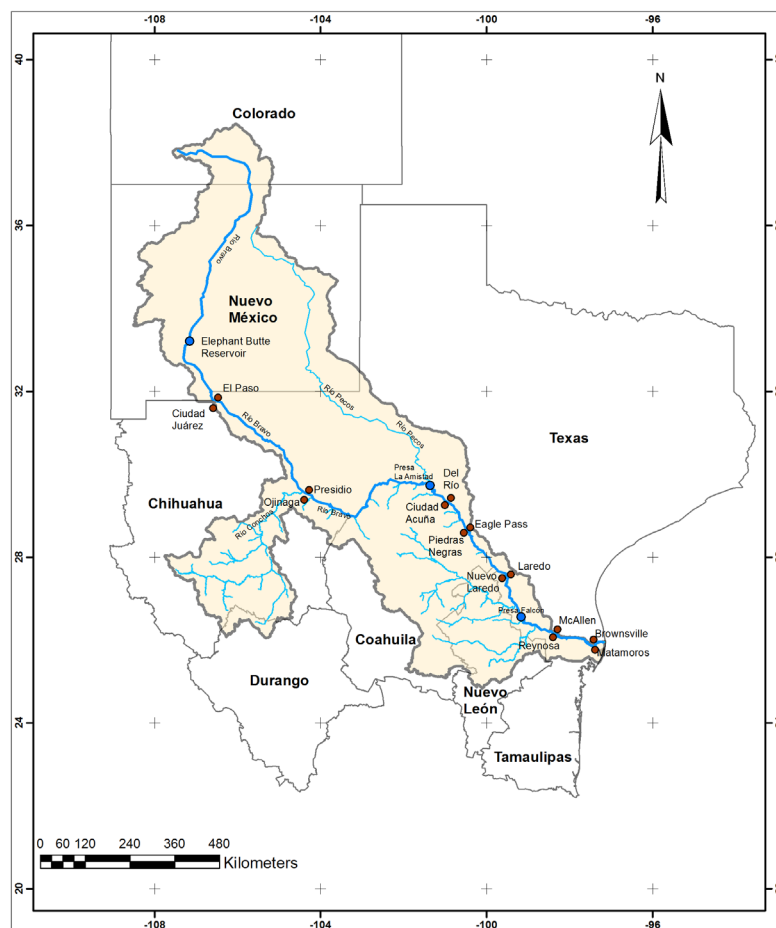


Figura 1 | Localización de la cuenca del río Bravo/Grande en la república Mexicana y EE.UU.

El río Bravo/Grande es administrado y gestionado por la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA), que es un organismo internacional creado en 1889 por EE.UU. y México con el fin de aplicar los tratados internacionales sobre límites y aguas entre estas dos naciones. La CILA se constituye por dos secciones; la sección estadounidense (IBWC por sus siglas en inglés), que es administrada por el Departamento de Estado de los Estados Unidos y la sección mexicana, la cual es administrada por la Secretaría de Relaciones Exteriores (OCRB, 2010). La distribución de las aguas del río Bravo/Grande quedó establecida mediante la firma de los gobiernos federales de ambos países, en la Convención de 1906, para Ciudad Juárez, y en el Tratado de Aguas Internacionales de 1944, para el tramo de Ciudad Juárez al Golfo (Von Der Meden et al., 2011).

La Sección de Estados Unidos opera y mantiene 14 estaciones de aforo en el cauce principal del río Bravo; 12 estaciones de aforo en los afluentes medidos en su país y además varias estaciones en canales de derivación y de flujo de retorno. Por el otro lado, la sección mexicana opera y mantiene 4 estaciones de aforo en el canal principal, 8 estaciones hidrométricas ubicadas en los tributarios y las estaciones hidrométricas ubicadas en los canales de desvío y el caudal de retorno en el país. Asimismo, la sección de los Estados Unidos opera 13 estaciones de aforo para la alerta de inundaciones y la operación del almacenamiento de regulación de las inundaciones en las presas internacionales La Amistad y Falcón (CILA, 2014).

El estudio se centrará en la zona comprendida entre las estaciones hidrométricas identificadas como “08-3650.00” ubicada en las coordenadas 31°46'35"N y 106°31'20"W en el kilómetro 2017 del río; entre El Paso, Texas y Cd. Juárez, Chihuahua; y la estación “08-4750.00”, ubicada a 0.3 km aguas abajo de la planta de bombeo “El Jardín” y a 11.2 km aguas abajo del puente de la carretera internacional (Gateway) entre Brownsville, Texas y Matamoros, Tamaulipas. Es decir, se incluirán las estaciones que se tengan sobre el río y sus afluentes donde este sirve de frontera y límite entre Estados Unidos y México.

Procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

Desde el punto de vista conceptual, para calcular el caudal ecológico cualquier metodología o cualquier procedimiento partirá de reconocer las condiciones naturales del régimen hidrológico, su estado de alteración, sus posibilidades de conservación de sus componentes para alcanzar un estado ecológico deseado, es decir, un objetivo ambiental o de conservación (Barrios, 2011; DOF, 2012). Asimismo, serán válidas si reconocen que, un ecosistema acuático modifica sus atributos como respuesta al aumento de los niveles de estrés sobre el régimen hidrológico del cual dependa (DOF, 2012).

La Norma Mexicana: NMX-AA-159-SCFI-2012, se implementó para llegar al desarrollo de un criterio o guía para determinar el caudal ecológico, que ayude a la conservación de los ríos y aplique los métodos adecuados a cada situación para un mejor aprovechamiento en una cuenca. Esta misma en su carácter de voluntaria, no deja de funcionar como una herramienta disponible, con vista a mejorar, a través de su propia aplicación por la experiencia de los distintos usuarios que realicen estudios de asignaciones de agua en las cuencas, planeación de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica; actualización o modificación de los acuerdos de disponibilidad o distribución del agua, considerando el caudal ecológico para la conservación de los ecosistemas acuáticos (Gómez et al, 2013).

Las metodologías hidrológicas descritas en la norma se consideran como el requerimiento técnico mínimo y no excluyen la aplicación de metodologías complementarias o alternas más precisas, cuando la información o los recursos disponibles así lo permitan, en cuyo caso la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) determinará cuáles son los resultados que prevalecen atendiendo al nivel de detalle de los estudios realizados y considerando los intereses de los usuarios, así como por la problemática de las asignaciones o sobreasignaciones en la cuenca o región (Gómez et al., 2013). Las metodologías que se describen en la norma son las siguientes.

Método Tennant modificado por García

Existen varias modificaciones al método desarrollado por Tennant (1976) bajo ciertos criterios particulares de la región. En México, se ha aplicado el método de Montana para establecer caudales recomendados, los cuales se observan en la Tabla 1 y son propuestas por la CONAGUA (Salinas, 2011), para la evaluación de impactos ambientales por obras hidráulicas. Por otro lado, se han hecho modificaciones al método para zonas tropicales donde se consideran una variación climatológica trimestral anual tratando de reproducir variaciones de caudal durante el año (García et al, 2010). El modelo determina un volumen anual de escurrimiento en la cuenca, según las series históricas del régimen hidrológico natural y hace uso de objetivos ambientales para alcanzar un estado de conservación deseado. Esto se lleva a cabo tomando las recomendaciones propuestas por la norma y observadas en la Tabla 1.

Tabla 1 | Recomendaciones de porcentaje de caudales con objetivos ambientales relacionados propuesto por CONAGUA.

Objetivo ambiental	Período de estiaje		Período de avenidas	
	% EMA $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	%Q _{mi} $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	% EMA $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	%Q _{mi} $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
A	30	100	60	50
B	20	80	40	40
C	15	60	30	30
D	5	40	10	20

EMA=Escurrecimiento medio anual.

%Q_{mi}=Porcentaje del caudal medio mensual.

Metodología de “Gran Visión” propuesta por la alianza WWF–Fundación Gonzalo río Arronte, I.A.P.

Esta metodología se aplica en aquellas corrientes o cuerpos de agua nacionales a nivel de cuenca hidrológica donde se pretenda conservar su régimen hidrológico natural con la finalidad de reservar un volumen de agua para uso ambiental o para la conservación ecológica. El modelo pretende determinar el régimen anual de caudales con finalidad ambiental y el volumen anual de agua a reservar con finalidad ambiental. Para lo cual requiere una serie en régimen natural con al menos 20 años completos de información. Para tamaños menores de la serie se deberá analizar la representatividad de la misma en cuanto a la presencia de años húmedos, medios, secos y muy secos. Según el objetivo ambiental y la naturaleza de la corriente (permanente o intermitente), considerar el intervalo de porcentajes del Esgurrimiento Medio Anual (EMA) como valores de referencia para caudal ecológico según aparece en la Tabla 2.

Tabla 2 | Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales con base en la norma: NMX-AA-159-SCFI-2012.

Objetivo ambiental	Estado de conservación	Caudal ecológico (%EMA)	
		Corrientes perenes	Corrientes temporales
A	Muy bueno	≥ 40	≥ 20
B	Bueno	25-39	15-19
C	Moderado	15-24	10-14
D	Deficiente	5-14	5-9

En primer lugar se determinó el objetivo ambiental de la cuenca de estudio, siendo objetivo ambiental “D”. Según el objetivo ambiental y la naturaleza de la corriente, que es permanente o perene, se consideró el intervalo de porcentajes del Esgurrimiento Medio Anual (EMA) como valores de referencia para el caudal ecológico.

A partir de los Caudales Medios Mensuales (CMM o Q_{mi}), se asignó un porcentaje de reserva dentro del intervalo definido por el objetivo ambiental. El ajuste al interior del intervalo definido por el objetivo ambiental se realizó de mayor a menor (p.e. objetivo ambiental “D” 14, 13, 12,...,5) considerando en todo momento el interés de conservación de las cuencas, los posibles conflictos con el resto de usos del agua o las condiciones particulares de la masa de agua (como la contaminación o alteración morfológica). Para el caso particular de corrientes perennes, que es el caso del río Bravo/Grande, el caudal base se determinó como el caudal mínimo mensual. Para asignar el caudal ecológico se deberá tomar en cuenta la siguiente regla; si en temporada de estiaje el porcentaje del caudal medio mensual conforme al objetivo ambiental asignado es inferior al caudal base, entonces el caudal ecológico a asignar para ese mes deberá ser al menos igual al caudal base.

Metodología “Detallada” propuesta por la alianza WWF–Fundación Gonzalo río Arronte, I.A.P.

Este método se utiliza en aquellos tramos donde existan obras hidráulicas (por ejemplo grandes presas o derivadoras) o tomas de agua (por ejemplo bombeo de pozos) que afecten significativamente al régimen hidrológico de la corriente o cuerpos de agua nacionales, y en consecuencia a los ecosistemas acuáticos asociados. La finalidad es conservar, o bien, recuperar o reconstruir el régimen hidrológico actual a partir del régimen hidrológico natural.

Los elementos y aspectos del régimen de caudales ecológicos a que determina el método son: a) el régimen anual de caudales ordinarios estacionales para las condiciones hidrológicas húmedas, medias, secas y muy secas, b) el régimen de avenidas, considerando al menos tres categorías de avenidas (intra-anales, interanuales de baja magnitud e interanuales de

media magnitud) con sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio y a partir de estos regímenes el volumen anual de reserva con finalidad ambiental.

Objetivos ambientales, presión de uso del agua y asignación de objetivos ambientales.

Los objetivos ambientales se determinan valorando la importancia ecológica y la presión por el uso del agua. De manera conceptual, los objetivos ambientales se pueden evaluar por medio de indicadores ecológicos y de gestión del agua, definidos en cuatro clases A (muy bueno), B (bueno), C (moderado) y D (fuertemente modificado).

Por otro lado, este objetivo se podrá determinar directamente en los casos que existan referencias explícitas de la normatividad ambiental referentes a las Áreas Naturales Protegidas (ANP), sitios Ramsar y hábitats de especies endémicas, amenazadas o en peligro de extinción. Así también cuando exista un acuerdo entre usuarios, comunidades locales y autoridades competentes (DOF, 2012)

La importancia ecológica puede evaluarse con base en los aspectos bióticos, aspectos de integridad ecológica y la alteración eco hidrológica. Esta tabla clasifica la importancia ecológica en muy alta, alta, media o baja. Se determina a partir de la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca, conforme a la información publicada por la CONAGUA. La importancia ecológica y la presión de uso sobre el recurso, permiten reconocer las necesidades ambientales del agua conforme a la vocación específica de cada cuenca o tramo en particular, de acuerdo con las reglas de decisión o criterios mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 | Matriz de objetivos ambientales con base en la norma: NMX-AA-159-SCFI-2012.

Importancia Ecológica	Muy Alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
		Baja	Media	Alta	Muy Alta
Presión de Uso					

Clasificación y delimitación de las estaciones hidrométricas a utilizar.

La realización del estudio se llevó a cabo diferenciando las estaciones en 3 clases. Esto debido a que las de primer clase se encuentran con un cauce natural sin gran manipulación aparente del hombre; mientras aquellas estaciones de la segunda y tercer clase se encuentran precedidas de una gran presa por lo cual el caudal que circula en estas se encuentran gestionadas en su totalidad por hombre (Figura 2). La primera clase cuenta con 11 estaciones que se localizan aguas arriba de la presa internacional “La Amistad”. En la tercera clase se encuentran 21 estaciones que se localizan aguas debajo de la presa “La Amistad” pero aguas arriba de la presa “Falcón”. Por último, las 5 estaciones de la tercera clase se encuentran aguas debajo de la presa “Falcón” y antes de la desembocadura del Río Bravo/Grande con el Golfo de México; además, cada clase se dividió a su vez en tramos. Estos tramos fueron conformados atendiendo lo marcado en la norma NMX-AA-159-SCFI-2012. La norma indica que el caudal ecológico calculado para los datos de una estación hidrométrica será para el tramo comprendido entre esta misma y la siguiente estación o el siguiente punto de confluencia del río. En cuanto a los puntos de confluencia que están entre las estaciones, se propuso sumar el caudal marcado en la estación más el caudal de aportación de un arroyo o río y así tener un nuevo tramo con un caudal ecológico propio.

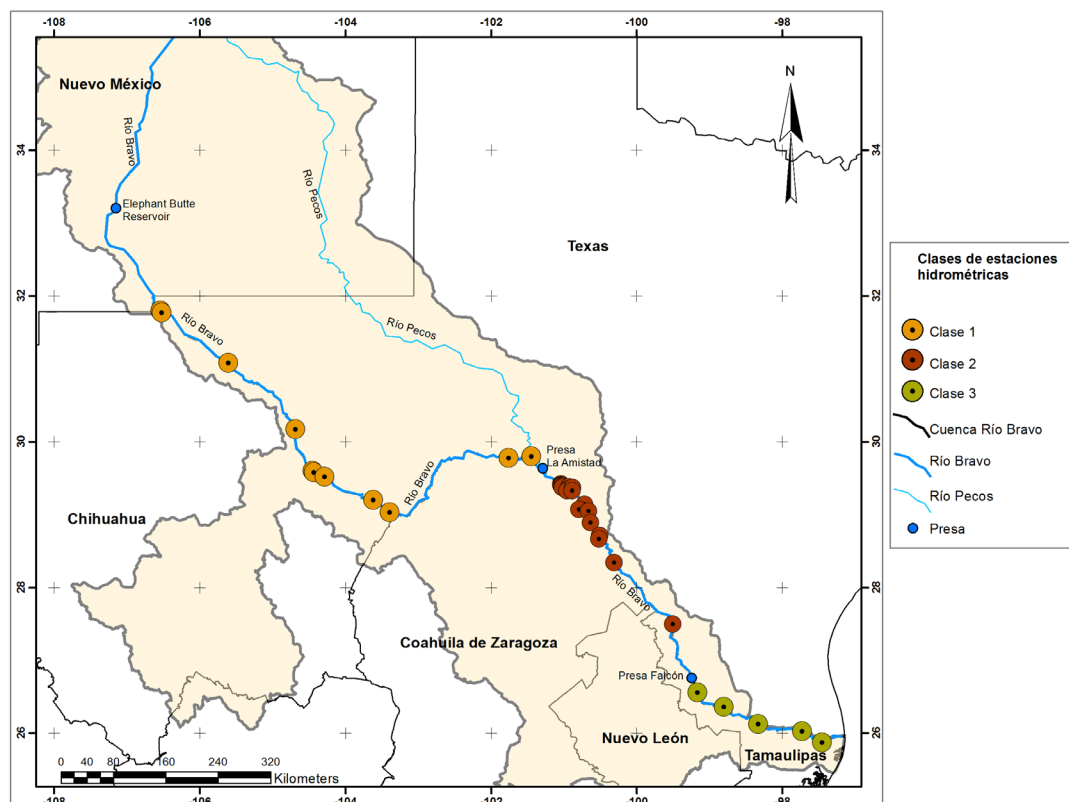


Figura 2 | Clases y ubicación de las estaciones hidrométricas y presas sobre el río Bravo/Grande.

Debido a que no todas las series de datos históricos estaban completas, se aplicaron los métodos de regresión simple, método de promedios vecinales, método de razones promedios y método de regresión múltiple para completar las series. Posteriormente, se verificó la homogeneidad de los datos de cada una de las estaciones. Esta verificación se realizó mediante pruebas o test estadísticos aplicables a las series de datos climatológicos. Estas pruebas fueron de dos tipos: a) no paramétricas: prueba “U” de Student y la prueba de Cramer; b) paramétricas: prueba de secuencias y el test de Helmert.

Actualmente, el río Bravo/Grande se encuentra intervenido por una gran cantidad de infraestructura hidráulica de menor y mayor relevancia. La infraestructura de gran relevancia es llamada así debido a su tamaño y la importancia de regulación del agua que tienen. Dentro del río se encuentran grandes presas internacionales de almacenamiento y generación de energía eléctrica las cuales son: presa “La Amistad” y presa “Falcón”. Estas presas cobran gran relevancia debido a que regulan el caudal del río. Debido a ello se hizo necesario analizar si los tramos subsiguientes a donde se encuentran estas presas (mediante las estaciones de clase 1, en el caso de la presa La Amistad, y las de la clase 2 en caso de la presa Falcón) han sufrido algún grado de alteración en el régimen hidrológico actual (RHA) con relación al natural (RHN). Es decir, si las presas han afectado significativamente al régimen hidrológico natural de caudales y a los ecosistemas acuáticos asociados, a partir de su entrada en funcionamiento.

Con este análisis se obtuvo el régimen de volúmenes circulantes de manera mensual y anual, del estado natural y actual, y el grado de afectación de este último sobre el primero. Para llevarlo a cabo se requirió de una serie a escala mensual con al menos 20 años completos de cada tipo de régimen hidrológico (natural y actual o presumiblemente alterado). Se tomó una estación representativa sobre el río en cada una de las 2 clases a analizar de tal forma que cumpliera con la cantidad de datos solicitada. Dentro del tramo a analizar correspondiente a la presa “La Amistad” (las estaciones clasificadas de la segunda clase) se tomó la estación con clave 08-4580.00 “Río Grande at Piedras Negras, Coahuila and Eagle Pass, Texas”. Para analizar el tramo correspondiente a la presa “Falcón” (estaciones clasificadas como de la tercera clase) se escogió la estación con clave 08-4750.00 “Río Grande near Brownsville, Texas and Matamoros, Tamaulipas”. La elección de estas estaciones fue debido a que cumplieran con veinte años completos de datos para los regímenes natural y actual. Para el estudio también fue necesaria

información referente al inicio del funcionamiento de las presas. En el caso de la presa “La Amistad” en 1968 se inició el almacenamiento de agua, en 1969 se termina la construcción y en 1969 es inaugurada por lo que los periodos que se tomaron fueron: para caracterizar el régimen hidrológico natural (RHN) de 1948-1967 y para el régimen hidrológico actual (RHA) de 1970-1989. En cuanto a la presa “Falcón” se inauguró a finales del 1953 por lo cual para el periodo de RHN se tomó 1934-1953 y para el periodo de RHA se cogió el periodo de 1955-1974. En los cuatro periodos se tomaron veinte años antes y después del inicio de funcionamiento. Estos datos se obtuvieron mediante la página web oficial de la CILA (2014). En primer lugar se ordenaron los datos a partir de la información hidrológica de la serie diaria, los caudales medios mensuales, separando las series en RHN y en régimen presumiblemente alterado (RHA).

Determinación del caudal ecológico

Como primer paso para la determinación del Caudal Ecológico, según la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, se tomó como base el objetivo ambiental de la corriente superficial (DOF, 2012). Este objetivo deberá conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema. La determinación de objetivo ambiental del río Bravo se establece a partir de su importancia ecológica y la presión de uso del agua que tiene. Esta clasificación de la importancia ecológica es en base a los aspectos bióticos, aspectos de integridad ecológica y la alteración ecohidrológica. La clasificación viene dada por la importancia ecológica en muy alta, alta, media o baja.

El nivel de la presión de uso para el río Bravo/Grande se estableció de acuerdo a los valores dados por la norma NMX-AA-159-SCFI-2012. En el caso de la región hidrológica a las cuales pertenece el río (RH24) se consideró una presión de uso “Muy Alta” según el apéndice normativo A de la norma (objetivos ambientales para las cuencas hidrológicas de México). Esto quiere decir que el porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca o acuífero es mayor al 80% generalizándolo a lo largo de todo el río.

RESULTADOS

Para el estudio se consideraron 37 estaciones hidrométricas de las 73 que tiene a su cargo el CILA sobre el lecho del río Bravo/Grande y sus principales afluentes, se dividieron las 37 estaciones involucradas en el estudio en 3 diferentes clases. La división se realizó debido al comportamiento de los gastos que circulan por ellas y a que entre ellas existen dos presas de gran relevancia. Las estaciones de la primera clase fueron 11, las de la segunda clase fueron 21 mientras que las de la tercera clase fueron 5 estaciones. Sin embargo, una vez efectuado los análisis, se descartaron estaciones en el tramo de estudio debido a que muchas de ellas son afluentes del río que van a dar directamente a las presas “La Amistad” y “Falcón”. También otro factor para descartar estaciones, fue que algunas estaciones cuantifican gastos de desvíos del río. Y por último se descartaron algunas estaciones del estudio debido a que cuantifican gastos de retorno. Estas estaciones descartadas no influyeron en la determinación del gasto ecológico sobre el río. Entre las seleccionadas se tienen 18 sobre el cauce del río Bravo/Grande (Tabla 4).

Conforme a las reglas de decisión mostradas en la matriz de la Tabla 5, se asignó el objetivo ambiental correspondiente a la cuenca hidrológica de estudio. Con ello se pudo concluir que en general el río Bravo presenta un objetivo ambiental “D” a lo largo de todo su cauce principal.

Tabla 4 | Estaciones hidrométricas consideradas en la determinación del caudal ecológico en el río.

Clase	Estación	Clave
Primer Clase	Rio Grande at El Paso, Txs.	08-3640.00
	Rio Grande below American Dam at El Paso, Txs. and Cd. Juárez, Chih.	08-3650.00
	Rio Grande at Fort Quitman, Txs. Near Colonia Luis Leon, Chih.	08-3705.00
	Rio Grande above Rio Conchos near Presidio, Txs. And Ojinaga, Chih.	08-3715.00
	Rio Grande below Rio Conchos near Presidio, Txs. And Ojinaga, Chih.	08-3742.00
	Rio Grande at Johnson Ranch near Castolon, Txs. And Santa Elena, Chih.	08-3750.00
	Rio Grande at Foster Ranch near Langtry, Txs. And Rancho Santa Rosa, Coah.	08-3772.00
Segunda Clase	Rio Grande below Amistad Dam near Cd. Acuna, Coahuila and del Rio, Texas	08-4509.00
	Rio Grande at del Rio, Texas and Cd. Acuna, Coahuila	08-4518.00
	Rio Grande near Jimenez, Coahuila and Quemado, Texas	08-4557.00
	Rio Grande at Piedras Negras, Coahuila and Eagle Pass, Texas	08-4580.00
	Rio Grande near el Indio, Texas and Villa Guerrero, Coahuila	08-4587.00
	Rio Grande at Laredo, Texas and Nuevo Laredo, Tamaulipas	08-4590.00
Tercer Clase	Rio Grande below Falcon Dam near Falcon, Texas and Nueva Cd. Guerrero, Tamaulipas	08-4613.00
	Rio Grande at Rio Grande City, Texas and Camargo, Tamaulipas	08-4647.00
	Rio Grande below Anzalduas Dam near Reynosa, Tamaulipas and Mission, Texas	08-4692.00
	Rio Grande near San Benito, Texas and Ramírez, Tamaulipas	08-4737.00
	Rio Grande near Brownsville, Texas and Matamoros, Tamaulipas	08-4750.00

Tabla 5 | Objetivo ambiental D. Indicadores ecológicos y de gestión del agua a partir de la asignación de objetivos ambientales (Barrios et al, 2011).

Objetivo ambiental	Estado ecológico deseado	Estrategia de conservación	Indicadores ecológicos	Indicadores de gestión del agua
D	Fuertemente modificado	Recuperación	Los indicadores de calidad y biológicos no reflejan las condiciones naturales. Se presentan severas alteraciones de la estructura y función del ecosistema. Hay presencia de especies invasoras (p.e. lirio.). Las condiciones hidrológicas, geomorfológicas o fisicoquímicas explican estos cambios en las comunidades biológicas.	Zona con sobreexplotación de fuentes superficiales y subterráneas, tramos secos, cauces invadidos, extracción de materiales con impactos severos en la geomorfología del cauce. Clara evidencia de aguas residuales y funcionamiento del cauce como drenaje. El río se considera un espacio insalubre.

Método de Tennant modificado por García para México

La propuesta del caudal ecológico utilizando la metodología de Tennant se muestra en la Figura 3. Se observa que el caudal ecológico máximo se debe garantizar para $5.71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. >Además, el escurrimiento medio anual (EMA) es del orden de los $14.76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La temporada de estiaje se presenta de octubre a febrero.

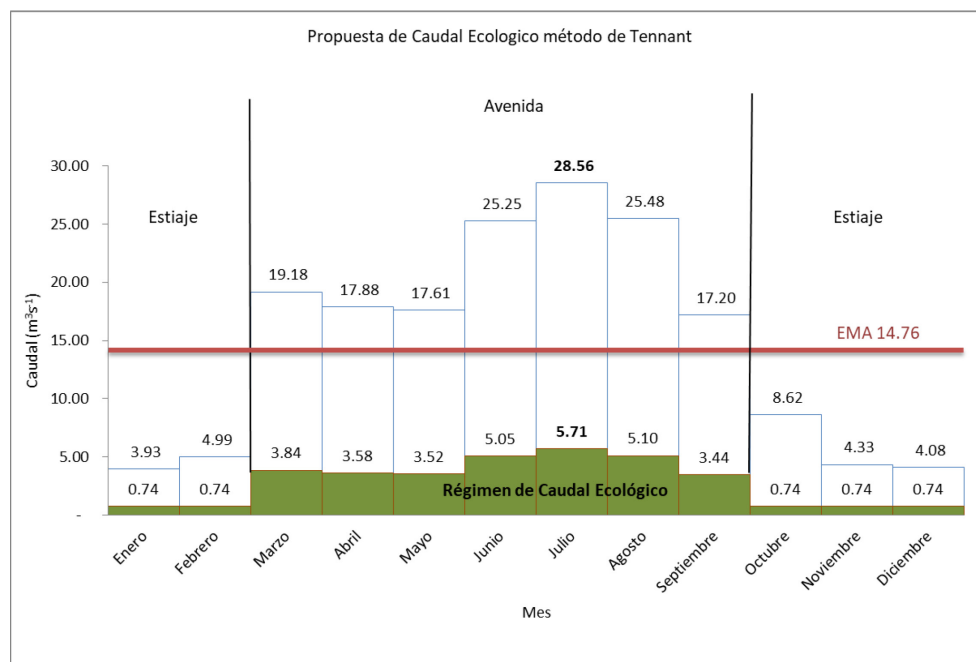


Figura 3 | Propuesta de Caudal Ecológico método de Tennant para la estación 08-3640.00 río Grande at El Paso, Texas.

Método de Gran Visión

La realización del método de Gran Visión se realizó para todos y cada uno de los tramos del río que sirven como línea fronteriza entre México y Estados Unidos. Esto fue llevado a cabo con las mismas series de datos utilizadas para el método de Tennant debido a que se demostró que las series se encuentran no alteradas dentro de las estaciones de la clase 2 y 3 aún con la entrada en funcionamiento de las presas. La Figura 4 muestra los resultados del caudal ecológico para la estación 08-3640.00 río Grande at El Paso, Texas. Los resultados arrojaron que el caudal ecológico máximo corresponde al mes de julio con $4.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El caudal ecológico mínimo corresponde al mes de enero con $0.55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

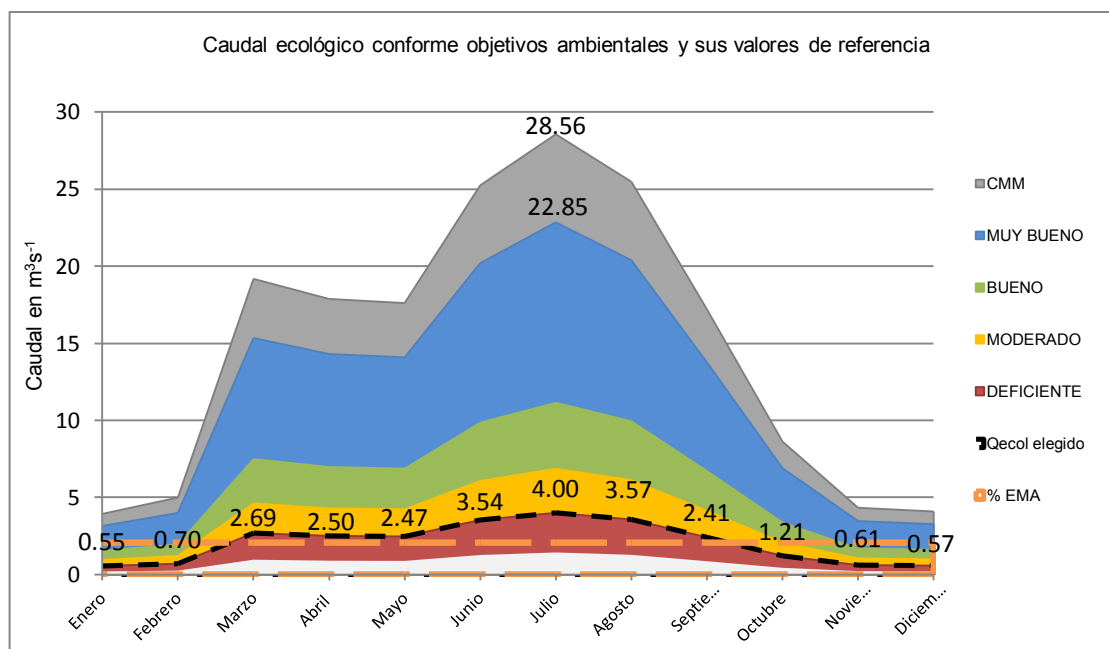


Figura 4 | Propuesta de caudal ecológico Método de Gran Visión para la estación 08-3640.00 río Grande at El Paso, Texas.

Obviamente, estos valores son muy bajos debido al objetivo ambiental que se utilizó, lo cual demuestra que el río está seriamente impactado.

Metodología detallada

Después de realizar el procedimiento para encontrar las variables para satisfacer la fórmula para la propuesta de caudal ecológico del Método Detallado, se llegó a obtener un valor de $2.33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 5).

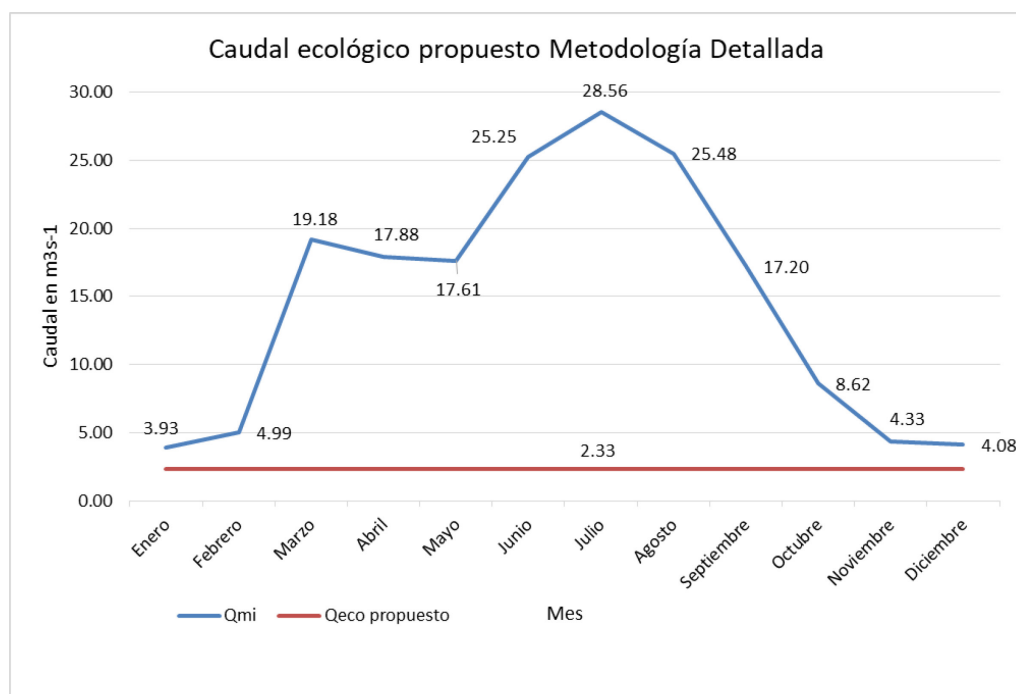


Figura 5 | Propuesta de caudal ecológico Metodología Detallada para la estación 08-3640.00 río Grande at El Paso, Texas.

Integración de las propuestas de regímenes de caudales ecológicos

Al contar con las propuestas de caudal ecológico para cada uno de los tramos formados entre estaciones hidrométricas y de cada una de las clases, se integraron los resultados para tener una “estimación del caudal ecológico” para el tramo conformado por cada clase en que se dividió río Bravo/Grande. Estos resultados se muestran a continuación.

El tramo conformado por las estaciones hidrométricas de la clase 1 es el que se localiza entre la estación con clave 08-3640.00 hasta antes de que el caudal del río entre en la presa “La Amistad”. De los resultados para cada tramo de las estaciones de clase 1 se tomaron los valores más altos para tener un régimen de caudal ecológico general para todo este tramo. Este régimen se observa en la Tabla 5.

Tabla 5 | Propuesta de régimen de caudal ecológico para el tramo conformado por las estaciones de clase 1.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal ecológico Clase 1	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83	13.76	22.04	17.02	11.83	11.83

Las estaciones hidrométricas de la clase 2 se encuentran entre la estación con clave 08-4509.00 hasta antes de que el caudal del río entre en la presa Falcón. De los resultados para cada tramo de las estaciones de clase 2 se tomaron los valores más altos para tener un régimen de caudal ecológico general para todo este tramo. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 | Propuesta de régimen de caudal ecológico para el tramo conformado por las estaciones de clase 2.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal ecológico Clase 2	23.24	23.24	24.47	23.24	23.24	23.24	23.24	23.24	25.48	23.24	23.24	23.24

El tramo conformado por las estaciones hidrométricas de la clase 3 es el que ubica entre la estación río Grande below Falcon dam near Falcon, Texas and Nueva Cd. Guerrero, Tamaulipas, con clave 08-4613.00 hasta antes de que el caudal del río desemboque en el Golfo de México. Esta clase cuenta con 5 tramos. De los resultados para cada tramo de las estaciones de clase 3 se tomaron los valores más altos para tener un régimen de caudal ecológico general para todo este tramo. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 | Propuesta de régimen de caudal ecológico para el tramo conformado por las estaciones de clase 3.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal ecológico Clase 3	22.6	22.62	22.62	32.69	34.11	22.86	22.62	22.62	24.87	22.62	22.62	22.62

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos de la aplicación de la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, la cuenca del río Bravo/Grande tiene una alta alteración en su condición ecológica de los sistemas fluviales, por lo que se ve modificada la zona de captación y el hábitat debido a la infraestructura hidráulica. A pesar de lo anterior, conservan en alguna medida su funcionamiento, estructura y servicios básicos, a pesar de haber presentado cambios físicos, manteniéndose así ciertos componentes del régimen hidrológico. Mediante el método Tennant modificado por García se pudo estimar los caudales ecológicos tomando en cuenta un porcentaje del escurrimiento medio anual (EMA); así como, porcentajes propuesto del caudal medio mensual (Qmi). El método “De Gran Visión” de la alianza WWF-Fundación Gonzalo río Arronte fue el más sencillo utilizado. Este estimó el caudal ecológico mediante un porcentaje del EMA y mediante el mismo porcentaje de Qmi. En contraparte, el Método Detallado de esta misma alianza fue un método complejo que cuenta con muchas variables para llegar a la estimación de una propuesta de caudal ecológico mediante un porcentaje del EMA.

CONCLUSIONES

Se logró llevar a cabo la estimación del Caudal Ecológico para el río Bravo, en el tramo entre el Paso, Texas y Cd. Juárez, Chihuahua hasta la desembocadura del río en el Golfo de México. Esta estimación se realizó mediante el contraste de los resultados arrojados por los métodos hidrológicos mencionados en la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. El río Bravo/Grande presenta un estado ecológico modificado y requiere una recuperación del ecosistema. Además presenta alteraciones en la estructura y función del ecosistema y sobreexplotación del agua. Por lo anterior, el objetivo ambiental que persigue el río y con el cual se asoció la investigación fue “D”. La información de las series de datos hidrométricos de las estaciones sobre el cauce del río, tomadas de la página oficial del CILA, es confiables. Los comportamientos de los regímenes de caudales ecológicos se comportaron en forma de incremento, de aguas arriba a aguas abajo, en los tramos conformados por

las estaciones de clase 1 y 2, mientras que en los tramos de las estaciones de clase 3 se comportaron en forma de decremento, de igual manera de aguas arriba a aguas abajo. Esto fue de forma general. También, se logró obtener un régimen de caudal ecológico para los tramos en que se dividió el río. Asimismo, se tiene la estimación de 3 propuestas para los tramos conformados por las 3 clases de estaciones hidrométricas para el régimen de caudal ecológico para el río Bravo en el tramo completo de estudio.

Por último, en cuanto a los tramos en conjunto de las clases, el tramo con mayor caudal ecológico fue el conformado por las estaciones de clase 2, seguido del caudal del tramo de las de clase 3 y finalmente el tramo de las estaciones de clase 1 fue el que menor caudal ecológico registro.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por la beca académica otorgada al joven julio César Palomo Mendoza para la realización de sus estudios de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental. Así mismo, se agradece el financiamiento otorgado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León México para la realización y presentación de esta comunicación en las V Jornadas de Ingeniería del Agua.

REFERENCIAS

- Barrios Ordóñez, J.E., R. Sánchez Navarro, S.A. Salinas Rodríguez, J.A. Rodríguez Pineda, I. D. González Mora, R. Gómez Almaraz, H. Escobedo Quiñones y J.A. Reyes González (2011). Guía para la determinación de caudal ecológico en México. Programa Manejo del Agua en Cuencas Hidrográficas: Desarrollo de Nuevo Modelos en México. Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I. A. P. México, 98 pp.
- Bustamante Toro, César Augusto. Monsalve Durango, Elkin Aníbal y García Reinoso, Pedro León. (2007). Los caudales ecológicos: Herramienta fundamental en la gestión integral de las Fuentes Hídricas del Quindío. Revista de Investigaciones No. 17 - Universidad del Quindío pp. 205 - 221. Armenia. ISSN 1794-631 X.
- CILA. (2014). Informe Anual 2008. Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos. Recuperado de <http://www.cila.gob.mx/publicaciones/2008.pdf>.
- CILA. (2017). Comisión Internacional de Límites y Aguas. Recuperado de la página de internet oficial <http://www.ibwc.gov>.
- Diario Oficial de la Federación (2012). Norma Mexicana MX-AA-159-SCFI-2012, “Procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas” 118 págs. Publicación del 20 de septiembre del 2012.
- García Rivera S., O. Calahorra Fuertes, L. Vázquez Hernández (2010). Determinación del caudal ecológico preliminar en un tramo del río Los Pescados, utilizando diferentes métodos hidrológicos. Comisión federal de electricidad. XXI Congreso nacional de hidráulica. Guadalajara Jalisco. Octubre 2010.
- Gómez, M., Rodríguez, S. y Saldaña, P (2013). Análisis comparativo de los métodos hidrológicos aplicados en la norma de caudal ecológico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Memorias del tercer congreso nacional de manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional Autónoma de México Morelia, Michoacán.
- Martínez, L. (2012). Determinación de caudales ambientales para ríos de la cuenca del río San Juan (México) mediante la aplicación de métodos hidrológicos. Tesis de Maestría no publicada. UANL, Nuevo León, México.
- Naiman R, H Décamps. 1997. The ecology of interfaces: Riparian zones. Annual Review of Ecology and Systematics 28(1): 621-658.
- Organismo de Cuenca del Río Bravo (2010), www.conagua.gob.mx/OCRB Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Organization of American States (2013). Marco regional para el uso sostenible del Río Bravo. Department of Sustainable Development (DSD), Organización de los Estados Americanos. Recuperado el 15 de octubre del 2013 de la página de internet: http://www.oas.org/dsd/WaterResources/projects/RioBravo_esp.asp.

Ortiz, R. (2008). Estimación de caudales ambientales mínimos en la cuenca del río Amajac. Tomado de la memoria del XXIII congreso latinoamericano de hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, 2008.

Palau, A. 1994. Los mal llamados caudales “ecológicos”. Bases para una propuesta de cálculo. Obra pública NO 28 (Ríos II), 84-95.

Salinas, S. (2011). Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos. Aproximaciones hidrológicas. Comisión Nacional del Agua con el apoyo de la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. 26 págs.

Tennant, D.L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environment resources. Proceedings on Instream Flow Needs Symposium. 326-327.

Von Der Meden, J., Rodríguez, A., De la Maza, M., Zapata, J., Martínez, A., Cleghorn, A., Parra, H., Briggs, M., Montes, J. Y Peters, E. (2011). Las cuencas hidrográficas de México. Cuenca transfronteriza del río Bravo/Grande.

WWF. (2015). World Wildlife Fund. Características del desierto Chihuahuense. Artículo recuperado de http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/desierto_chihuahuense/