



# Reporte 2019

## Estimación de Caudales Ecológicos para la Cuenca del Río Bravo

### Autores

Dr. Samuel Sandoval Solis,  
M. en C. Laura E. Garza Díaz  
Dr. Oscar A. Leal Nares

## Índice

<b>1</b>	<b><i>Introducción de caudales ecológicos</i></b> .....	<b>3</b>
1.1	El medio ambiente como proveedor de agua para el hombre .....	3
1.2	Régimen natural de los ríos .....	4
1.3	Alteración de los caudales naturales del río. ....	4
1.4	Estado actual del Río Bravo .....	5
<b>2</b>	<b><i>Objetivos del estudio</i></b> .....	<b>5</b>
2.1	Objetivo General .....	5
2.2	Objetivos Específicos .....	5
2.3	Justificación y alcances .....	6
<b>3</b>	<b><i>Caso de estudio: Río Bravo</i></b> .....	<b>6</b>
3.1	Ecosistema de la cuenca del Río Bravo .....	6
3.2	Alteración del régimen hidrológico del Río Bravo / Grande .....	6
3.3	Caudales ecológicos a lo largo de la cuenca .....	7
<b>4</b>	<b><i>Metodología para la estimación de caudales naturales</i></b> .....	<b>9</b>
4.1	Estimación del caudal natural del Río Bravo .....	10
4.2	Determinación del método para la estimación del caudal ecológico .....	11
4.3	Estimación de los caudales ecológicos en el Río Bravo .....	12
<b>5</b>	<b><i>Resultados</i></b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b><i>Conclusión</i></b> .....	<b>18</b>
<b>7</b>	<b><i>Bibliografía</i></b> .....	<b>18</b>

## 1 INTRODUCCIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS

### 1.1 El medio ambiente como proveedor de agua para el hombre

Nuestro planeta constituye un conjunto medioambiental equilibrado, en el que todos los elementos interaccionan entre sí, incluido el hombre. El medio ambiente es proveedor de uno de los recursos naturales más importantes para el hombre, el agua. Los ecosistemas de agua dulce como los humedales, los ríos, lagos y acuíferos son indispensables para sostener la vida en el planeta y para proveer un conjunto de servicios ecosistémicos para el humano y el medio ambiente. Algunos de los servicios ecosistémicos son: la provisión de agua potable para el humano, la provisión de agua para agricultura y la industria, la mitigación de inundaciones mediante la conservación de hábitats naturales, soporte de vida acuática y ribereña, entre otros. Por ello resulta indispensable integrar aspectos económicos, sociales, políticos, ecológicos e hidrológicos mediante estrategias que aseguren el uso sustentable del agua a largo plazo. Los caudales ecológicos o ambientales son utilizados como una herramienta que logra equilibrar la salud de los ecosistemas y el bienestar humano. Dichos caudales establecen cuánto del régimen hidrológico natural de un río debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia la planicie de inundación para mantener los valores característicos del ecosistema (Tharme, 1996). El desarrollo de los caudales ambientales comenzó en el oeste de los Estados Unidos de América a fines de la década de 1940 y se planteó durante la década de 1970 como resultado de la nueva era de la política ambiental del agua y el final de la era hidráulica.

El objetivo principal de los caudales ecológicos es mantener el ecosistema fluvial y sus servicios ecológicos a través de un régimen de caudal que se asemeje a su estado natural. Sin embargo, existen diversos objetivos específicos como lo son: la conservación de especies nativas, el mantenimiento de la biota ribereña y las especies acuáticas, la redistribución de sedimentos, la reconfiguración de las zonas de inundación, la recarga de acuíferos, el mejoramiento de la calidad de agua, entre otros, (Tharme y King, 1998;. King et al, 1999). Los caudales ecológicos son idealmente implementados en ríos alterados. La escala de implementación puede variar ampliamente, desde un tramo de río hasta toda una cuenca con un río principal y sus tributarios (King et al., 1999). La resolución también puede variar, desde implementar un solo pulso anual hasta un régimen de flujo más complejo donde las asignaciones mensuales igualen los flujos base, así como los caudales de sequía y de avenidas. Existen diferentes metodologías para atender un amplio rango de necesidades, tanto de escala y de resolución espacial, como de disponibilidad de datos, capacidad técnica y soporte económico (Tharme, 1996; Arthington et al., 1998a).

## 1.2 Régimen natural de los ríos

Cada río en la tierra tiene un sello distintivo que lo hace único. En términos hidrológicos se le denomina régimen natural. El paradigma del régimen natural descrito por Poff. *et al.* (1997) postula que la estructura y función de un ecosistema fluvial, así como las adaptaciones de sus especies ribereñas y acuáticas, están dictadas por un caudal natural, el cual sigue un patrón de variación temporal. El régimen natural de los caudales mantiene la integridad ecológica del ecosistema. Es importante notar que cada río es único, ya que se distingue por tener diferentes patrones que son determinados por la ubicación, geología, topografía, clima y cobertura vegetal donde se encuentra. No obstante, todos los ríos comparten componentes esenciales que forman la base para lograr un sistema ecosistémico íntegro. Estos componentes son; *la magnitud*, refiriéndose a la cantidad de agua que pasa por una ubicación fija por unidad de tiempo; *la frecuencia* o el número de veces que se repite una unidad de flujo determinado por una magnitud específica en un intervalo de tiempo ; *la duración*, que es el período de tiempo asociado con un evento de flujo específico; y *la tasa de cambio*, que se refiere a la rapidez con la que un flujo cambia de una magnitud a otra (Capilla y Ward, 1989; Karr, 1991; Richter et al., 1997; Rapport et al, 1998; Rosenberg et al, 2000). Naturalmente, los ríos están en constante transformación, los caudales efímeros, estacionales y perenes son esenciales para el mosaico del hábitat fluvial. Esta variabilidad hidrológica también influye desde la distribución de las especies y la abundancia hasta el éxito relativo y la evolución de las especies.

## 1.3 Alteración de los caudales naturales del río.

Las alteraciones humanas, en los ecosistemas de agua dulce, han modificado el régimen natural de los ríos y han agotado este recurso en todo el mundo. La construcción de presas, los desvíos de agua, la canalización de arroyos, las transferencias de agua entre cuencas y la explotación de acuíferos; están produciendo efectos a escala global sobre el medio ambiente (Rosenberg *et al.*, 2000). Es importante estipular que los ríos son particularmente sensibles a los cambios ambientales y a dichas perturbaciones humanas que ocurren dentro de la cuenca, debido al alto grado de conectividad longitudinal en los ríos (McCluney et al., 2014). La intensa manipulación del régimen hidrológico ha afectado la heterogeneidad de cuencas enteras y ha disminuido los niveles freáticos de sus mantos acuíferos. Por otra parte, las presas y canales generan perturbaciones y desviaciones creando un sistema fragmentado, afectando así, las funciones principales de los ríos; como la reducción en la magnitud y la frecuencia de los regímenes de sequía y de crecidas. Asimismo, la geomorfología de los ríos, como la forma del canal, la densidad y la estructura, se llegan a afectar. Esto provoca erosión, captura de sedimentación y reducción de los bancos de los ríos (Benda et al. 2014). Estas acciones han alterado profundamente los recursos de agua dulce de la Tierra, causando cambios

rápidos y sustanciales en la salud del ecosistema. El mantenimiento de poblaciones, especies, hábitats y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos proporcionados por los ríos requerirá una gestión activa para la recuperación de los ecosistemas fluviales (Vitousek, *et al* 1997).

#### **1.4 Estado actual del Río Bravo**

El Río Bravo/Río Grande es una cuenca transfronteriza compartida entre México y los Estados Unidos que es sujeta a una amplia gama de desafíos ambientales, socioeconómicos y climáticos en un clima político complejo. Es considerado como uno de los ríos más estresados e impactados del mundo (Woodhouse, Stahle y Díaz, 2012) por una combinación de condiciones climáticas altamente variables y el aumento de la presión antropogénica. Históricamente, la cuenca ha sido manipulada únicamente para la gestión de recursos hídricos humanos (Enriquez-Coyro, 1976), dejando de lado cualquier necesidad ambiental del ecosistema. La cuenca proporciona agua a más de 6 millones de personas y 2 millones de acres de tierra irrigada. La cuenca del Río Bravo es una cuenca escasa y sus recursos hídricos a menudo son insuficientes para cumplir con los requisitos humanos y ambientales, incluso sin tomar en cuenta los efectos del cambio climático. La complejidad de la alta variabilidad estacional junto con la alta competencia del agua entre los usuarios ha trazado una barrera en la asignación de agua para el medio ambiente. Actualmente existen diversos estudios donde se proponen caudales ecológicos en la cuenca del Río Bravo, siendo el estudio del Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Fund (WWF) México) uno de los más completos, pero únicamente aplicado para la subcuenca del Río Conchos. Sin embargo, se requieren estudios que complementen toda la cuenca del Río Bravo desde la cabecera de la cuenca en el Río Conchos, hasta su desembocadura en el Golfo de México.

## **2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

### **2.1 Objetivo General**

El objetivo general del presente estudio es la estimación de caudales ecológicos a lo largo del cauce principal del Río Bravo en los alcances del Big Bend y Johnson Ranch; además de cuatro de sus tributarios, el Río Salado, el Río Escondido, el Río Álamo y el Río San Juan.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del estudio son:

- 1) Determinar el caudal natural mensual del cauce principal y de los cuatro tributarios de 1900 a 1943
- 2) Identificar los volúmenes anuales escurridos de 1950-2008

- 3) Utilizar el método de Percent Flow (Richter et al. 2012) para escalar los caudales naturales al volumen anual escurrido.

### **2.3 Justificación y alcances**

Por ese motivo, existe la necesidad de compilar y estimar caudales naturales a lo largo de toda la cuenca. Alcanzar este objetivo permitirá complementar el estudio de la WWF México y recuperar la integridad del río mediante la conexión de tramos fragmentados o degradados. Además de preservar hábitats y ecosistemas adecuados para el soporte de especies nativas y proveer la cantidad de agua suficiente para mantener la demanda de agua existente.

## **3 CASO DE ESTUDIO: RIO BRAVO**

### **3.1 Ecosistema de la cuenca del Río Bravo**

La cabecera del Río Bravo se origina en Estados Unidos en las montañas San Juan del estado de Colorado, este drena el sur de las Montañas Rocosas de Colorado y pasas por Nuevo México. La parte alta del Río Bravo llega a la ciudad de El Paso Texas, y confluye con la subcuenca del Río Conchos en el punto llamado La Junta. El Río Conchos se genera en la Sierra Madre Occidental en Chihuahua y proporciona hasta el 75 por ciento del flujo al bajo Río Bravo. La confluencia entre el Alto Río Bravo y el Río Conchos constituye el límite internacional entre los Estados Unidos y México, hasta llegar al Golfo de México. Cerca de la mitad de la cuenca se localiza en Estados Unidos y la otra mitad en México. La cuenca del río abarca unos 924000 km<sup>2</sup> y la longitud del río es de 3051 km. Su topografía varía considerablemente, desde las montañas y las gargantas de las cabeceras hasta los desiertos y el terreno subtropical de la cuenca baja. Su hidrología es dictada por un patrón de deshielo en las cabeceras y una firma de huracanes en la subcuenca del Río Conchos además de manantiales suplementarios a lo largo de la frontera entre ambos países. La riqueza del Río Grande está ligada a la diversa topografía e hidrología de la cuenca. La región incluye bosques y desiertos, aves migratorias, vastas áreas de pastizales y matorrales áridos, raras plantas desérticas, manantiales, ríos, arroyos y especies acuáticas endémicas que sostienen una rica diversidad de especies. La ictiofauna nativa del Río Bravo abarca desde salmónidos de agua dulce y ciprínidos endémicos en la cuenca superior hasta especies costeras y estuarias en los tramos más bajos.

### **3.2 Alteración del régimen hidrológico del Río Bravo / Grande**

La problemática hidrológica de este ecosistema transfronterizo, tan complejo y diverso reside en las modificaciones sustanciales de los últimos cien años. La sobre concesión de los derechos del agua, el

agotamiento de las aguas subterráneas, la retención de sedimentos, la reducción de la calidad del agua, la degradación del hábitat y la vasta introducción de especies exóticas son algunas de las presiones que han agotado la cuenca. La expansión de represas ha alterado patrón de flujo natural del río, alterando su frecuencia, temperatura y magnitud del caudal de los ríos (Hoeinghaus, 2018). El crecimiento de la población, la agricultura y el consumo en la cuenca ha aumentado la presión sobre los recursos hídricos. Además de desviar más agua a las represas o canalizar partes del río, al menos 30 manantiales se han secado en los estados de Chihuahua y Coahuila (Contreras-Balderas y Lozano-Vilano, 1994). Bajo estas condiciones, las descargas de los ríos se reducen, por lo que las sequías se han vuelto más devastadoras debido a la sobre explotación del agua subterránea para fines agrícolas o municipales. Tales condiciones no solo representan un estrés adicional para las especies nativas, sino que también aumentan los niveles de salinidad (Hogan, Phillips, Mills y Chesley, 2007). La degradación de estos ecosistemas ribereños junto con la pérdida de manantiales ha tenido un gran impacto en la vida silvestre y en la integridad del Río Bravo y sus tributarios.

### 3.3 Caudales ecológicos a lo largo de la cuenca

El concepto de caudal ambiental o caudal ecológico se incorporó a las regulaciones ambientales de México en el período de 1994 a 2012, a través del Reglamento de la Ley Nacional del Agua y la Norma Mexicana NMX-159-SCFI -2012. Como resultado de este proceso, y como parte del proceso de desarrollo de la Norma Mexicana, el sector de educación e investigación desarrolló estudios para estimar los flujos ecológicos requeridos en algunos ríos del país (Bustamante, Vargas-López, y Jaramillo-Villanueva, 2014). A continuación, se presentan algunos estudios basados en métodos hidrológicos y holísticos tanto en el cauce principal como en tres tributarios.

#### *Métodos hidrológicos*

El método hidrológico de Tennant modificado por García y utilizado por la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 es el enfoque más común para estimar los flujos ambientales en el Río Bravo. Guerra-Cobián, VH, Ferriño-Fierro, AL, Cavazos-González, RA, Palomo-Mendoza, JC, Yépez-Rincón, (2017) llevaron a cabo la estimación de los flujos ambientales para el Río Grande, en la sección entre El Paso, Texas y Cd. Juárez, Chihuahua, hasta la desembocadura del río en el Golfo de México. Zepeda Martínez, (2012) utilizó el mismo método para la subcuenca del Río San Juan, ubicada en el estado de Nuevo León, México. Vidales-Contreras *et al.* (2014) estimó tasas de flujo ambiental basadas en índices hidrológicos como tasas de caudal mínimo para años secos y tasas de caudal medio para años húmedos, para el río Pilón,



también localizado en el estado de Nuevo León; y, por último, el estudio de Lanza Espino, González Villela, González Mora, y Hernández Pulido, (2018) estimó caudales ambientales para el alcance de Matamoros y Brownsville hasta el Golfo de México.

### *Métodos holísticos*

El Fondo Mundial para la Naturaleza (2009) estimó los flujos ambientales en 9 lugares a lo largo de la cuenca del río Conchos a través del uso del método de construcción de bloques, una metodología holística. Este método reconoce la necesidad de un enfoque multidisciplinario, con las disciplinas centrales relacionadas con hidrología, hidráulica, sedimentología, geomorfología fluvial, química del agua, ictiología, botánica ribereña y acuática, zoología (invertebrados) y socio economía. Este estudio formó parte del Programa de Manejo Integrado de la Cuenca de Río Conchos desde 2004. Un total de 50 expertos trabajaron en la determinación de dichos flujos ambientales. Sandoval-Solis y Mckinney (2009) evaluaron la viabilidad hidrológica de los flujos ambientales en el afluente del río Conchos al río Bravo. Este estudio incluyó la política de operación del sistema de presas La Boquilla-Francisco I. Madero. En dicho estudio se consideraron las políticas de distribución de agua entre los Estados Unidos y México y a los usuarios del Río Bravo. Lane & Porse (2015) abordaron la necesidad de una gestión integrada del agua en el área del “Big Bend” o “La Curva Grande” de la cuenca del Río Bravo. El estudio propuso una política alternativa en la operación de presas para proporcionar caudales ambientales y proveer de los servicios para el consumo humano (suministro de agua, control de inundaciones y obligaciones del tratado binacional). Su política mejoró las provisiones de suministro de agua, redujo el riesgo promedio anual de inundaciones y mantuvo las provisiones históricas de los tratados. Además, Porse, Sandoval-Solis, & Lane(2015) analizaron cinco caudales ambientales para la mejora del hábitat acuático y ribereño en la región de Big Bend. En este estudio se implementó una novedosa integración de metodologías de caudales ambientales mediante el acoplamiento de modelos de programación lineal para evaluar las políticas de operación de los embalses. Sus resultados indican que existe suficiente agua en la cuenca para implementar caudales ambientales sin afectar a la agricultura y la demanda municipal. Por último, las recomendaciones sobre los caudales ambientales para el Río Devils y el Río Pecos por el Upper Rio Grande Basin and Bay Expert Science Team, (2012) demostraron un gran énfasis en la importancia del transporte de sedimentos y el análisis de la geomorfología para pulsos de avenidas. Además, evaluaron la calidad del agua y modelaron el hábitat para 10 especies de peces utilizando caudales de sequía y de avenidas.



#### 4 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES NATURALES

Existen variadas metodologías de estimación de caudales ambientales que se pueden agrupar en métodos hidrológicos, hidráulicos, ecohidráulicos y holísticos. La elección del método más apropiado depende del objetivo que se requiera en el sistema

- *Metodologías Hidrológicas*

Esta metodología requiere registros de caudal histórico natural, ya sea en forma mensual o diaria. Los flujos recomendados se representan como una proporción del flujo natural comúnmente denominado flujo o caudal mínimo. El objetivo es mantener un nivel aceptable de salud del río junto con sus características ecológicas, en forma estacional, anual o mensual. El método más comúnmente utilizado es el Tennant.

- *Metodologías de calificación hidráulica*

Este enfoque está basado en la relación entre el caudal y las condiciones hidráulicas del río. La metodología se determina a partir de un conjunto de variables hidráulicas y el flujo de descarga, identificando puntos de inflexión donde una reducción significativa del porcentaje de descarga disminuirá la calidad del hábitat. Estas variables son comúnmente perímetro húmedo, profundidad máxima, secciones transversales de los ríos y estas se consideran como un sustituto de los factores del hábitat.

- *Metodologías ecohidráulicas: simulación de hábitat y metodologías de modelado de microhábitats*

Este método se basa en las relaciones entre las condiciones hidráulicas y el hábitat hidráulico favorecido para especies representativas o objetivo. Los cambios relacionados con el flujo en el microhábitat físicos modelan y simulan con la información estacional disponible sobre el rango de hábitat utilizado por un pez o especie objetivo. La salida es en forma de curvas de descarga de hábitat para biota específica, tiempo de hábitat y series de excedencia utilizadas para derivar flujos ambientales óptimos.

- *Metodologías holísticas*

Este tipo de enfoque incorpora el concepto del caudal natural o del "paradigma de flujo natural". Este enfoque apunta a sostener y conservar los ecosistemas fluviales en lugar de centrarse en solo algunas especies indicadoras. Utiliza el régimen hidrológico natural como un proxy para usar un régimen de flujo modificado que se aproxima a la variabilidad del flujo natural.

#### 4.1 Estimación del caudal natural del Río Bravo

El escurrimiento natural para toda la cuenca del Río Bravo/Grande ha sido estimado, desde la cabecera del Río Bravo/Grande en las montañas de San Juan hasta Fort Quitman por Blythe and Schmidt (2018) y desde la Junta de los Ríos en la confluencia del Río Conchos y el Río Bravo/Grande en Ojinaga hasta la desembocadura del Río Bravo/Río Grande en el Golfo de México por González-Escorcia 2017 y Loredó-Rasgado 2018. La Figura 1 muestra el régimen natural (1900-1943) y el régimen histórico regulado (1950-2008) de la cuenca del Río Bravo y sus tributarios. El análisis muestra el régimen natural a la salida del Golfo de México de 11,243 hm<sup>3</sup> a comparación de los 780 hm<sup>3</sup> que actualmente logra llegar a la salida. Es importante mencionar que, si bien algunos tributarios y entradas de flujo no aparecen en el esquemático de la Figura 1, si fueron considerados para el balance histórico total.

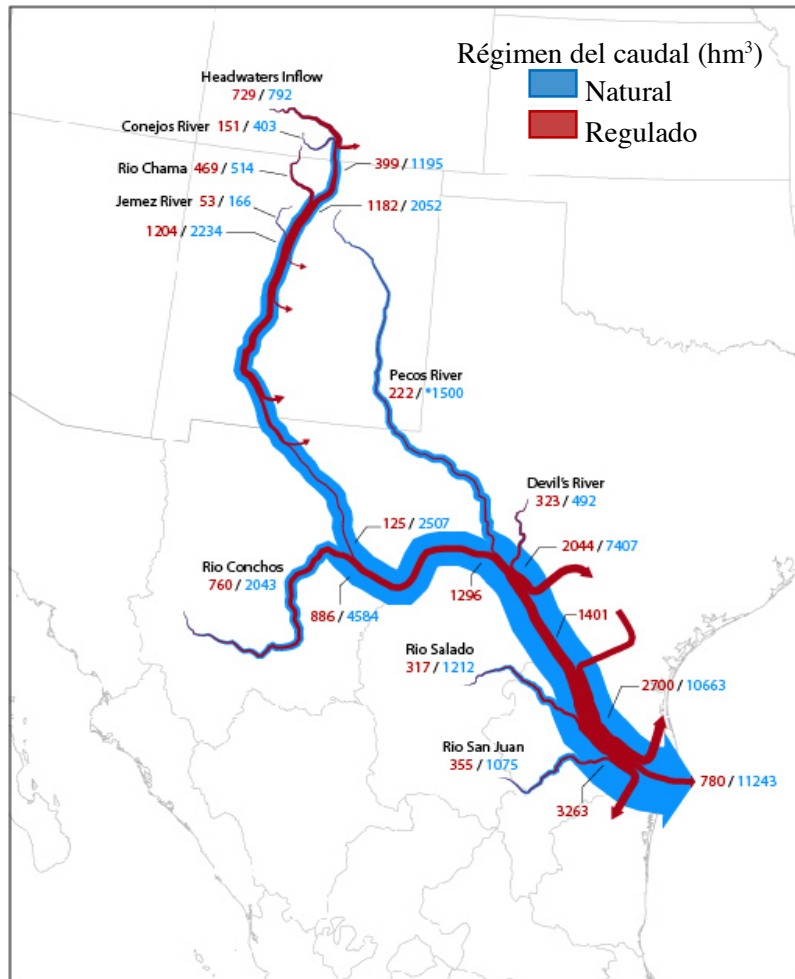


Figura 1. Caudal natural y caudal regulado (hm³) en la cuenca del Río Bravo/Grande.

#### 4.2 Determinación del método para la estimación del caudal ecológico

Para determinar los caudales ecológicos del Río Bravo, se utilizó la metodología de *Percent of Flow* (POF) o “Porcentaje de flujo” por Richter et al. (2012). El método POF reconoce la variabilidad del caudal natural y establece un estándar de protección que parte del flujo natural expresado como porcentaje alterado. Dicho modelo sugiere diferentes niveles de protección (Figura 2). El que se recomienda es un alto nivel de protección ecológica, es decir que el porcentaje de alteración no sea mayor al 10%. Proveer un alto nivel de protección significa que se puede mantener la integridad del ecosistema natural y la función del ecosistema fluvial con cambios mínimos. Se proporciona un nivel moderado de protección cuando los flujos se modifican en un 11-20%; un nivel moderado de protección significa que puede haber cambios mensurables en la

estructura y cambios mínimos en las funciones del ecosistema. Las alteraciones mayores al 20% probablemente resultarán en cambios de moderados a importantes en la estructura natural y las funciones del ecosistema, con un mayor riesgo asociado con mayores niveles de alteración en los flujos diarios.

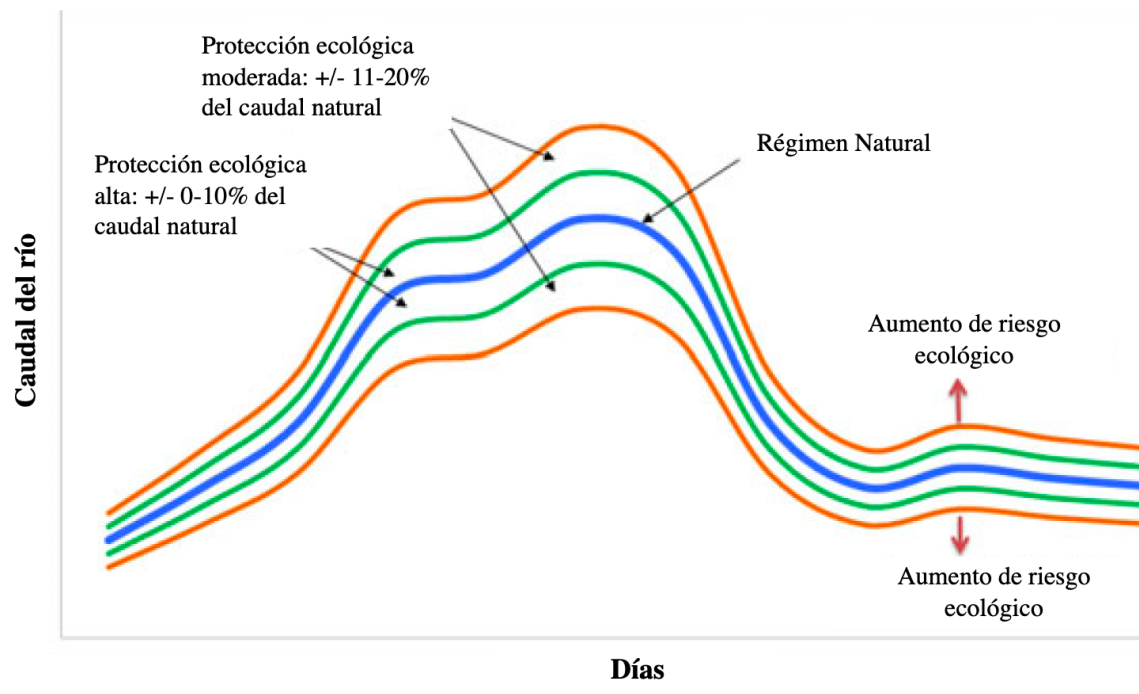


Figura 2. Estándares propuestos para proporcionar niveles moderados a altos de protección ecológica. Cuanto mayor sea la distancia a la del caudal natural, mayor el riesgo ecológico. Figura adaptada por Richter et al. (2012)

La principal ventaja que el método POF tiene sobre otros enfoques es que es un método protector para la variabilidad de los diferentes caudales. Los métodos que se basan en umbrales o flujos mínimos, como el método Tennant, permiten que la variabilidad del caudal se convierta en una “línea plana” afectando el dinamismo, la complejidad y la integridad del comportamiento de un río. Esto generalmente ocurre cuando hay demasiada presión por parte de la demanda, lo que hace que las operaciones de las presas se diseñen para sólo cumplir con estos requisitos mínimos de liberación. Es por ello que se decidió utilizar este método protector para la cuenca del Río Bravo.

### 4.3 Estimación de los caudales ecológicos en el Río Bravo

Se estimaron caudales ecológicos para cuatro tributarios; el Río Salado, Río Escondido, Río Álamo y Río San Juan. El caudal natural de cada tributario se utilizó como nuestra base para la estimación de los caudales ecológicos. Primeramente, se obtuvo el promedio mensual de los caudales naturales de 1900 a 1943 y el

promedio mensual de los caudales históricos de 1950 a 2008. Con estos datos se calculó el porcentaje que representa el caudal histórico sobre el caudal natural (Tabla 1).

*Tabla 1 Caudales naturales e históricos de los tributarios del Río Bravo*

	<b>Caudal Natural Anual (hm<sup>3</sup>) (1900-1943)</b>	<b>Caudal Histórico Anual (hm<sup>3</sup>) (1950-2008)</b>	<b>Porcentaje actual del caudal natural</b>
<b>Río Salado</b>	859	318	37%
<b>Río Escondido</b>	92	56	61%
<b>Río Alamo</b>	216	105	49%
<b>Río San Juan</b>	1523	357	23%

En este estudio se calcularon dos tipos de caudales ecológicos, los de mantenimiento y los de sequía. Los de mantenimiento sugieren implementarse en ciclos de años normales y húmedos. Los caudales ecológicos de sequía sugieren implementarse en ciclos de sequía. Los caudales ecológicos se estimaron mediante el producto del porcentaje actual de cada tributario sobre el promedio de su respectivo caudal histórico mensual. De esta manera se logró obtener un patrón hidrológico que siguiera la firma del caudal natural de cada tributario, pero utilizando su volumen histórico. Ahora bien, para los caudales secos se tomó en cuenta el 50% de los caudales de mantenimiento.

## 5 RESULTADOS

Los resultados demuestran gráficamente los caudales naturales, los caudales históricos y los caudales ecológicos de mantenimiento y de sequía para el Cauce principal: Río Conchos en Ojinaga y Río Bravo en Johnson Ranch, y para cuatro tributarios: Río Salado, Río Escondido, Río Álamo y Río San Juan. Estos resultados permiten valorar la tendencia histórica en comparación con la tendencia natural. La mayoría de los caudales históricos representan menos del 50% del caudal natural. Los volúmenes de los caudales ecológicos con respecto al escurrimiento natural garantizan de la mejor manera posible la integridad de la cuenca ya que busca de la mejor manera acercarse al caudal natural. La Figura 3 y 4 y el apéndice I representan los caudales en el cauce principal del Río Bravo, en Ojinaga y en Johnson Ranch. Los caudales ecológicos en estos dos puntos se basan en dos pulsos prioritarios; el primer pulso representa la firma del deshielo, que ayuda a la provisión de hábitats para especies nativas. El segundo pulso representa la firma de huracanes, el beneficio es el movimiento y transporte de sedimentos. Los resultados para los tributarios se observan en la Figura 5-8. En ellos se observa una mejora en la distribución de los caudales con un mejor patrón al caudal natural, los tributarios del Salado y el Escondido denotan una mejora sustancial ya que el patrón histórico difiere significativamente al caudal natural. La implementación de esos caudales ayudará a la resiliencia del sistema tanto ambientalmente como ecosistémicamente.

### Cauce Natural

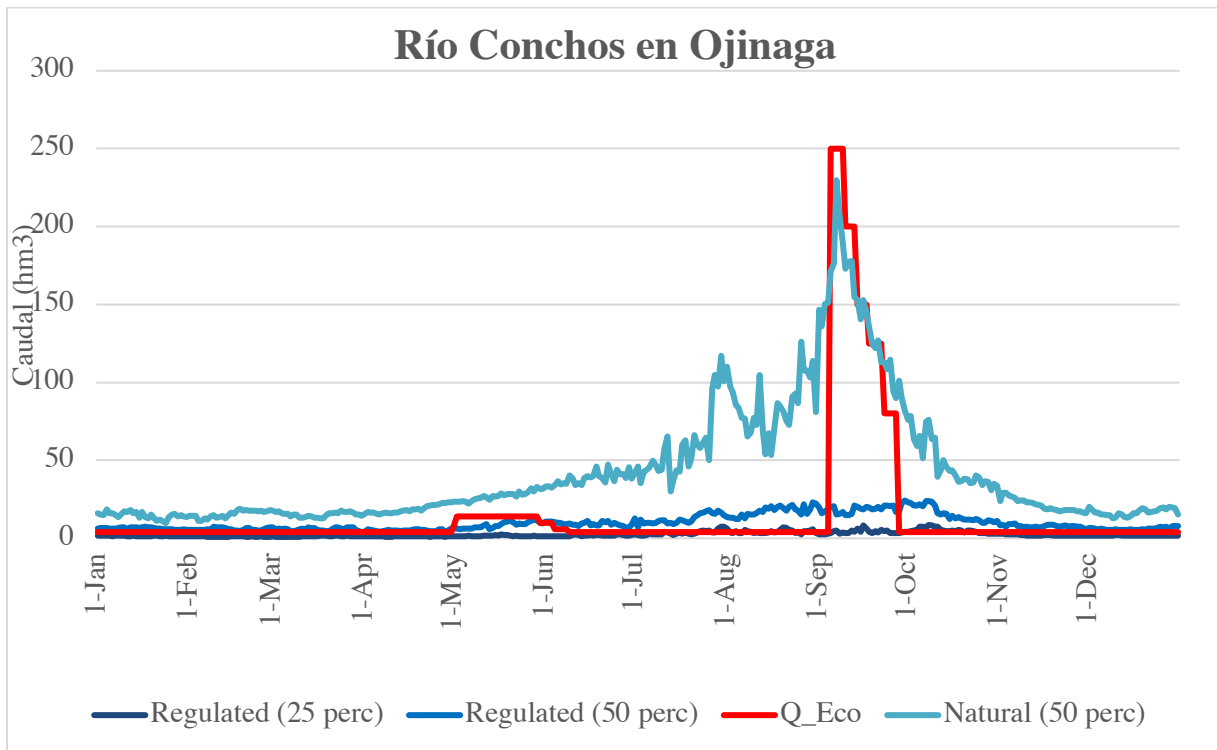


Figura 3. Caudales ecológicos de para el Río Conchos en Ojinaga.

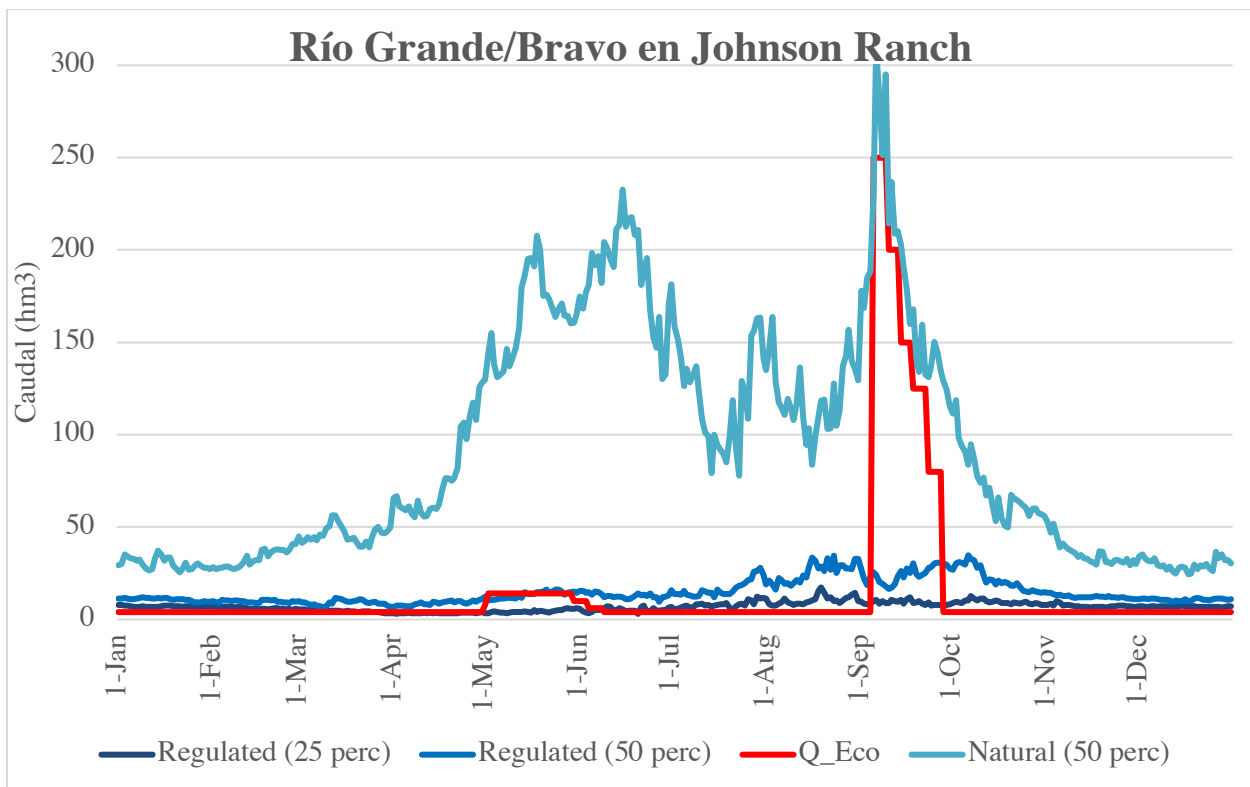


Figura 4. Caudales ecológicos de para el Río Conchos en Johnson Ranch



Tributarios

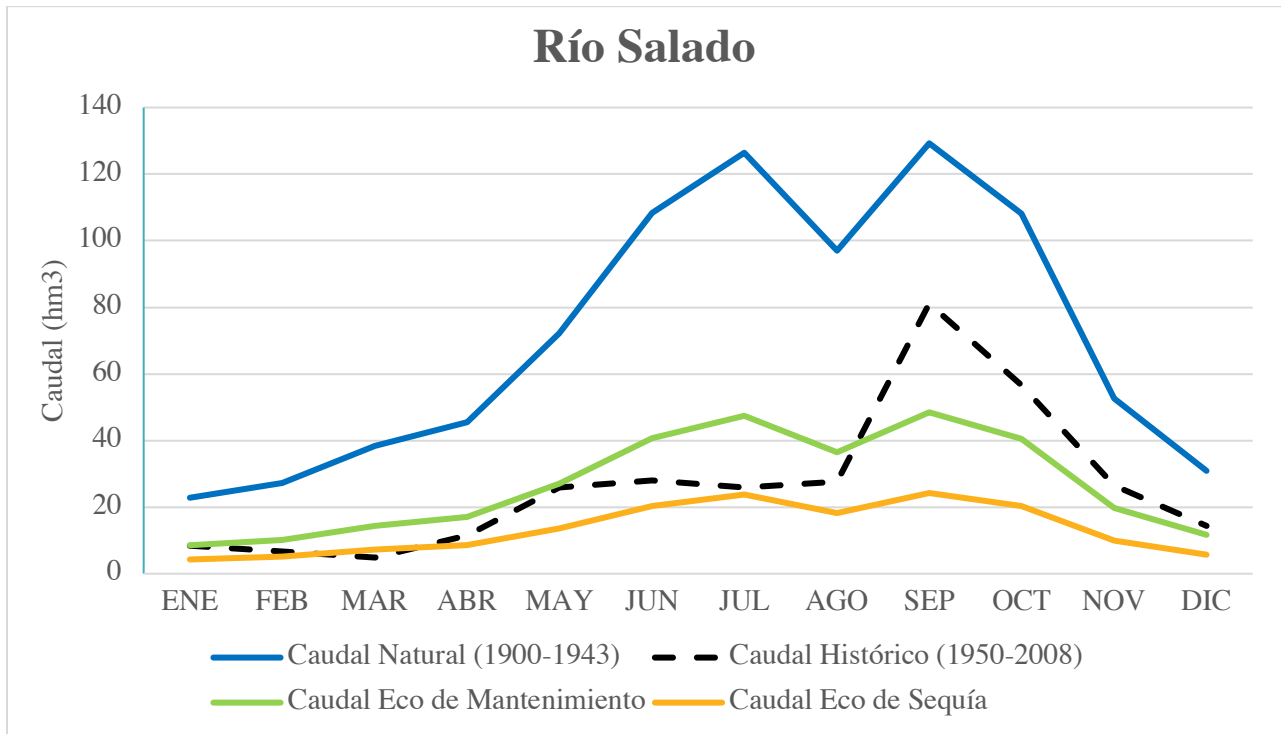


Figura 5. Caudales ecológicos de mantenimiento y de sequía propuestos para el Río Salado.

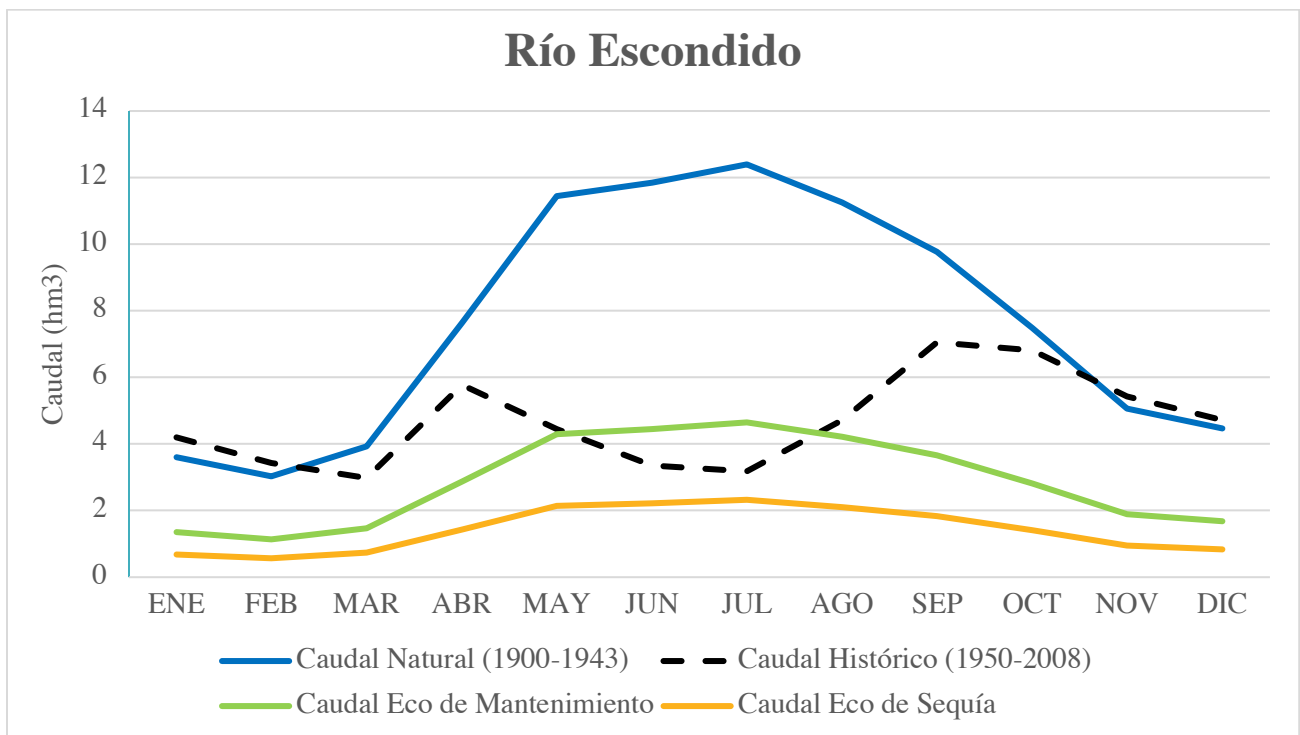


Figura 6. Caudales ecológicos de mantenimiento y de sequía propuestos para el Río Escondido

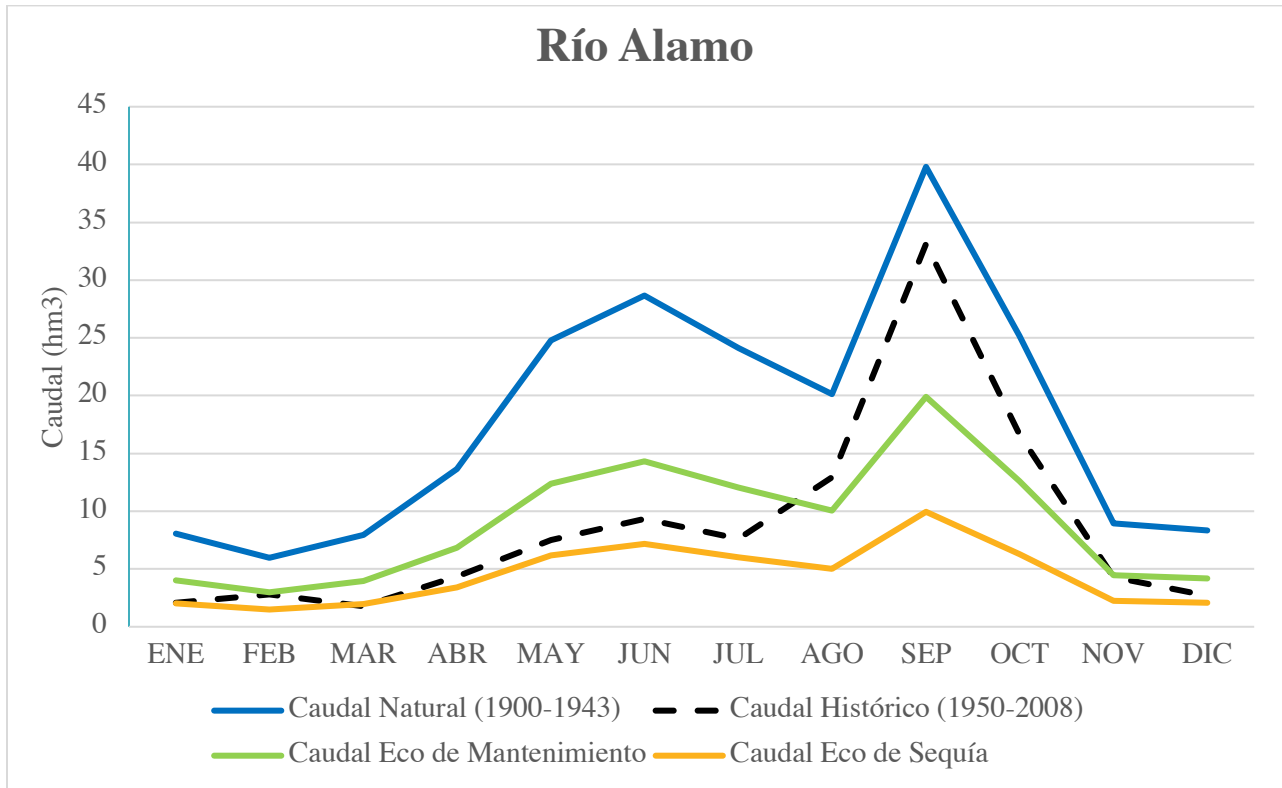


Figura 7. Caudales ecológicos de mantenimiento y de sequía propuestos para el Río Álamo.

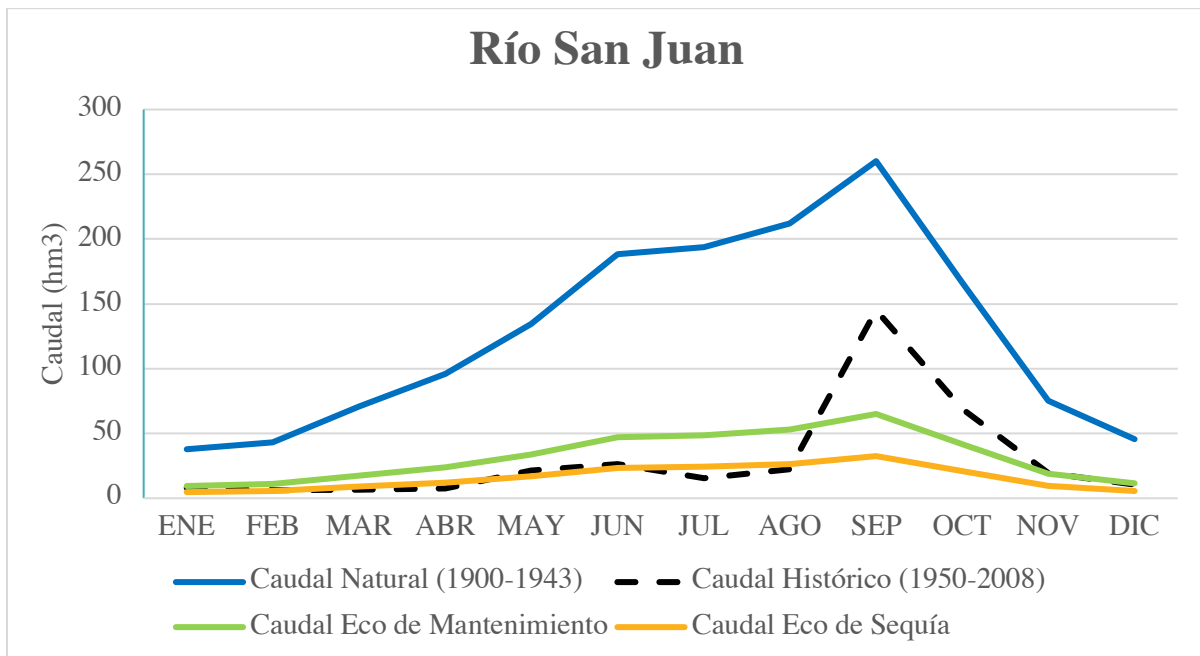


Figura 8. Caudales ecológicos de mantenimiento y de sequía propuestos para el Río San Juan.

## 6 CONCLUSIÓN

De acuerdo con el análisis de este estudio la cuenca del Río Bravo tiene un déficit de agua generada por presión antropogénica. Como resultado de estas alteraciones, la cuenca se ha deteriorado y modificado su funcionamiento, estructura y servicios ecológicos. La sobre concesión de los derechos del agua, el agotamiento de las aguas subterráneas, la retención de sedimentos, la reducción de la calidad del agua, la degradación del hábitat y la vasta introducción de especies exóticas son algunas de las presiones que han agotado la cuenca. La función de los caudales ecológicos es mantener el ecosistema fluvial y sus servicios ecológicos a través de un régimen de caudal que se asemeje a su estado natural. El concepto de caudal ambiental o caudal ecológico se incorporó a las regulaciones ambientales de México a través del Reglamento de la Ley Nacional del Agua y la Norma Mexicana, sin embargo, aún no se han implementado en la Cuenca del Río Bravo. Mediante el método Percent of Flow, una metodología holística se pudo estimar los caudales ecológicos de los tributarios y del cauce principal. Los volúmenes de los caudales ecológicos con respecto al escurrimiento natural garantizan de la mejor manera posible la integridad de la cuenca ya que busca de la mejor manera acercarse al caudal natural. Los beneficios de implementar caudales naturales en la cuenca del Río Bravo ayudarán a recuperar la integridad de la cuenca y a fortalecer los aspectos ambientales y ecológicos del río transfronterizo. Mayor investigación y análisis se requiere para poder abarcar aspectos de hábitat y conservación de medio ambiente, sin embargo, este estudio provee una buena aproximación para lograr la resiliencia de esta cuenca compartida entre el ambiente y el ser humano.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Bradsby, C. B. (2009). *The Environmental Flows Allocation Process*.
- Blythe T., and Schmidt, J. (2018). *Estimating the Natural Flow Regime of Rivers with Long-Standing Development: The Northern Branch of the Rio Grande*. *Journal of Water Resources Research*.
- Gonzalez-Escorcia, Y.A. (2017). *Determining the Natural Flow in the Transboundary Rio grande/Bravo Basin*. Master Thesis. Instituto Politecnico Nacional, University of California, Davis. Davis, CA.
- Loredo-Rasgado, J. (2018). *Natural Flow Regime and Water Footprint in the Rio Bravo/Grande Basin*. Master Thesis. Instituto Politecnico Nacional and University of California, Davis. Davis, CA.
- Richter, B. D., Davis, M. M., Apse C., and Konrad, C. (2012) . *A presumptive standard for Environmental Flow Protection*. *Journal of River Research and Applications*.
- Bustamante, A., Vargas-lópez, S., & Jaramillo-villanueva, J. L. (2014). *Los caudales ecológicos en*

- México : perspectivas y retos para su aplicación. In V. *Seminario Internacional Uso Racional del Agua “USRA.”*
- Contreras-Balderas, S., Edwards, R. J., de Lourdes Lozano-Vilano, M., & García-Ramírez, M. E. (2002). Fish biodiversity changes in the Lower Rio Grande/Rio Bravo, 1953--1996. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12(2), 219–240. <https://doi.org/10.1023/A:1025048106849>
- Contreras-Balderas, S., Ruiz-Campos, G., Schmitter-Soto, J. J., Díaz-Pardo, E., Contreras-McBeath, T., Medina-Soto, M., ... Lyons, J. (2008). Freshwater fishes and water status in México: A country-wide appraisal. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 11(3), 246–256. <https://doi.org/10.1080/14634980802319986>
- de la Lanza Espino, G., González Villela, R., González Mora, D. I., & Hernández Pulido, S. (2018). Caudal ecológico de ciertos ríos que descargan al Golfo de Mexico y al Pacífico Mexicano. *Revista Iberoamericana Del Agua*, 5(1), 3–15. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1442187>
- Guerra-Cobián, V. H., Ferriño-Fierro, A. L., Cavazos-González, R. A., Palomo-Mendoza, J. C., Yépez-Rincón, F. D. (2017). Estimación del caudal ecológico de la cuenca binacional Bravo / Grande mediante el contraste de modelos hidrológicos . del río (pp. 1–14).
- Heywood, C. E. (2003). Summary of Extensometric Measurements in El Paso , Texas Summary of Extensometric Measurements in El Paso , Texas.
- Hoagstrom, C. (2001). Historical and Recent Fish Fauna of the Lower Pecos River.
- Hoeinghaus, D. J. (2018). Dams and River Fragmentation. In D. A. Dellasala & M. I. Goldstein (Eds.), *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 241–248). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09826-8>
- Hogan, J. F., Phillips, F. M., Mills, S. K., & Chesley, J. T. (2007). Geologic origins of salinization in a semi-arid river: The role of sedimentary basin brines, (12), 1063–1066. <https://doi.org/10.1130/G23976A.1>
- Land, L. F., & Armstrong, C. A. (1985). *A preliminary assessment of land-surface subsidence in the El Paso area, Texas. Water-Resources Investigations Report.* Austin, TX. <https://doi.org/10.3133/wri854155>
- Lane, B. A., & Porse, E. C. (2015). ENVIRONMENTAL FLOWS IN A HUMAN-DOMINATED SYSTEM : INTEGRATED WATER MANAGEMENT STRATEGIES FOR THE RIO GRANDE / BRAVO BASIN. *RIVER RESEARCH AND APPLICATIONS River*, 1065(August 2014), 1053–1065. <https://doi.org/10.1002/rra>
- McCluney, K. E., Poff, N. L., Palmer, M. A., Thorp, J. H., Poole, G. C., Williams, B. S., ... Baron, J. S. (2014). Riverine macrosystems ecology: sensitivity, resistance, and resilience of whole river basins

- with human alterations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(1), 48–58. <https://doi.org/10.1890/120367>
- Platania, S. P. (1991). Fishes of the Rio Chama and Upper Rio Grande, New Mexico, with Preliminary Commentson Their Longitudinal Distribution, 36(2), 186–193.
- Porse, E. C., Sandoval-Solis, S., & Lane, B. A. (2015). Integrating Environmental Flows into Multi-Objective Reservoir Management for a Transboundary, Water-Scarce River Basin: Rio Grande/Bravo. *Water Resources Management*, 29(8), 2471–2484. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0952-8>
- Rinne, J. N. (1994). FISH FAUNA OF THE MIDDLE RIO GRANDE: STATUS, THREATS AND RESEARCH NEEDS, 1994., 1–32.
- Sandoval-Solis, S., & Mckinney, D. C. (2009). Hydrological Feasibility of Environmental Flows in the Rio Grande / Bravo Basin. In *World Environmental and Water Resources Congress* (Vol. 41036). [https://doi.org/10.1061/41036\(342\)497](https://doi.org/10.1061/41036(342)497)
- Texas Commission on Environmental Quality. (2014). *Chapter 298 - Environmental Flow Standards for Surface Water. SUBCHAPTER H: RIO GRANDE, RIO GRANDE ESTUARY, AND LOWER LAGUNA MADRE.*
- Upper Rio Grande Basin and Bay Expert Science Team. (2012). Environmental Flows Recommendations Report. *Final Submission to the Environmental Flows Advisory Group, Rio Grande Basin and Bay Area Stakeholders Committee and Texas Commission on Environmental Quality.*
- Vidales-contreras, J. A., Pissani-zuñiga, J. F., Rodríguez-fuentes, H., Sáenz, E. O.-, Aranda-ruiz, J., & Luna-maldonado, A. I. (2014). Regimens of Ecological Flow Rates on the Pilon River Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences REGIMENS OF ECOLOGICAL FLOW RATES ON THE PILÓN RIVER. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, (August).
- Woodhouse, C. A., Stahle, D. W., & Díaz, J. V. (2012). Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over the past 500 years. *Climate Research*, 51, 125–136. <https://doi.org/10.3354/cr01059>
- Zepeda Martinez, L. M. (2012). *DETERMINACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES PARA RÍOS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN ( MÉXICO ) MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS HIDROLÓGICOS.* UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN. FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DETERMINACIÓN.

## Apéndice I - Caudales Ecológicos

### Río Salado

		hm3												
Promedio		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	Caudal Natural (1900-1943)	23	27	38	45	72	108	126	97	129	108	53	31	859
	Caudal Histórico (1950-2008)	8	7	5	12	26	28	26	28	81	57	27	14	318
		hm3												
Porcentaje actual (Caudal histórico/Caudal Natural)		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0.375	Caudal Eco de Mantenimiento	9	10	14	17	27	41	47	36	48	41	20	12	322
Porcentaje	m3/s	3.2	4.2	5.4	6.6	10.1	15.7	17.7	13.6	18.7	15.1	7.6	4.3	
0.5	Caudal Eco de Sequía	4	5	7	9	14	20	24	18	24	20	10	6	161
	m3/s	1.6	2.1	2.7	3.3	5.1	7.8	8.8	6.8	9.4	7.6	3.8	2.2	

### Río Escondido

		hm3												
Promedio		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	Caudal Natural (1900-1943)	4	3	4	8	11	12	12	11	10	7	5	4	92
	Caudal Histórico (1950-2008)	4	3	3	6	4	3	3	5	7	7	5	5	56
		hm3												
Porcentaje actual (Caudal histórico/Caudal Natural)		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0.375	Caudal Eco de Mantenimiento	1	1	1	3	4	4	5	4	4	3	2	2	34
Porcentaje	m3/s	0.5	0.5	0.5	1.1	1.6	1.7	1.7	1.6	1.4	1.0	0.7	0.6	
0.5	Caudal Eco de Sequía	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	17
	m3/s	0.3	0.2	0.3	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	

### Río Alamo

		hm3												
Promedio		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	Caudal Natural (1900-1943)	8	6	8	14	25	29	24	20	40	25	9	8	216
	Caudal Histórico (1950-2008)	2	3	2	4	8	9	8	13	33	17	4	3	105
		hm3												
Porcentaje actual (Caudal histórico/Caudal Natural)		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0.5	Caudal Eco de Mantenimiento	4	3	4	7	12	14	12	10	20	13	4	4	108
Porcentaje	m3/s	1.5	1.2	1.5	2.6	4.6	5.5	4.5	3.8	7.7	4.7	1.7	1.6	
0.5	Caudal Eco de Sequía	2	1	2	3	6	7	6	5	10	6	2	2	54
	m3/s	0.8	0.6	0.7	1.3	2.3	2.8	2.3	1.9	3.8	2.4	0.9	0.8	

### Río San Juan

		hm3												
Promedio		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	Caudal Natural (1900-1943)	38	43	71	96	134	188	194	212	260	166	75	46	1523
	Caudal Histórico (1950-2008)	8	6	6	8	21	26	15	22	145	69	19	10	357
		hm3												
Porcentaje actual (Caudal histórico/Caudal Natural)		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0.25	Caudal Eco de Mantenimiento	9	11	18	24	34	47	48	53	65	42	19	11	381
Porcentaje	m3/s	3.5	4.5	6.6	9.2	12.5	18.1	18.1	19.8	25.1	15.5	7.3	4.3	
0.5	Caudal Eco de Sequía	5	5	9	12	17	24	24	26	33	21	9	6	190
	m3/s	1.8	2.2	3.3	4.6	6.3	9.1	9.0	9.9	12.5	7.8	3.6	2.1	

### Río Bravo en Johnson Ranch

		hm3												
Promedio		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	Caudal Natural (1900-1943)	115	107	141	213	536	654	531	701	767	323	139	143	4371
	Caudal Histórico (1950-2008)	47	41	42	32	47	70	93	132	210	155	54	42	965
		hm3												
Porcentaje actual (Caudal histórico/Caudal Natural)		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0.75	Caudal Eco de Mantenimiento	11	10	11	10	36	13	11	11	320	11	10	11	464
	m3/s	4.0	4.0	4.0	4.0	13.5	4.9	4.0	4.0	123.4	4.0	4.0	4.0	
	Caudal Eco de Sequía	8	7	8	8	27	10	8	8	240	8	8	8	348
	m3/s	3.0	3.0	3.0	3.0	10.2	3.7	3.0	3.0	92.6	3.0	3.0	3.0	