

EL CAUDAL AMBIENTAL EN EL MANEJO INTEGRADO DE LAS CUENCAS: CASO DE ESTUDIO (RÍO VERDE, OAXACA, MÉXICO)

THE ENVIRONMENTAL FLOW IN THE INTEGRATED MANAGEMENT OF WATERSHEDS: CASE STUDY (RÍO VERDE, OAXACA, MEXICO)

González Villela, Rebeca¹; Sánchez Chávez, Javier; Bravo Inclán, Luis A.; Mijangos Carro, Marco

Resumen

La metodología holística DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) y otros cuatro métodos para cuantificar el caudal ecológico (Tennant Modificado para México, IHA, Multivariados y PHABSIM) fueron utilizados para el cálculo del caudal ambiental en el Río Verde (Oaxaca). Los resultados señalan valores similares para los caudales calculados con los diferentes métodos. Asimismo, se consideró la información biofísica (hidrología, hidrodinámica, geohidrología, topografía, vegetación terrestre y acuática, suelo, calidad del agua, ictiología, entomología y el manglar), así como la socioeconómica (desechos, riesgos, irrigación, tecnificación y temporalidad agrícola, actividades agrícolas e industriales, zonas de tránsito, área sembrada, costumbres, cultura, migración, empleo y turismo) del río, en relación con los caudales ambientales para la estación seca y húmeda, y para generar las medidas de manejo y mitigación de los impactos ambientales en el proyecto de presa "Paso de la Reina". Los caudales ecológicos recomendados en (m³/s) fueron: Caudales Extremos Bajos de 12.75 a 30.0; Caudales Bajos de 32.1 a 70.15; Caudales Altos de 150 a 260; Pulsos de Caudal Altos de 350 a 500; Pequeñas Inundaciones 548.52 a 1000 y Grandes Inundaciones de 3000 a 4000. Estrategia de caudales que cubren las características de frecuencia, duración, magnitud y periodicidad para mantener las condiciones hidráulicas, la geometría del canal, tipos de sedimentos en el sustrato, el balance de agua dulce y salada en la desembocadura, así como del agua subterránea, la distribución de los organismos terrestres y acuáticos a lo largo del río y las condiciones socioeconómicas relacionadas con los cambios de caudal. Se describen las consecuencias de la alteración parcial o total de los componentes del caudal ambiental y se generaron los escenarios en relación con cierta condición de estado ecológico para el río y las especies analizadas, así como las evaluaciones de impacto, medidas de mitigación y planes de manejo de la cuenca.

Palabras clave: manejo de cuencas, potamología, impacto ambiental.

Abstract

The holistic methodology DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) and four other ecological flow methods (Tennant Modified for Mexico, IHA, Multivariate Analysis and PHABSIM) were used to calculate the environmental flow in the Río Verde (Oaxaca). The results indicate similar values for the flows calculated with the different methods. The multidisciplinary integration of biophysical information (hydrology, hydrodynamics, geohydrology, topography, aquatic and terrestrial vegetation, soil, water quality, ichthyology, entomology, hydrophytes, mangrove) and socioeconomic information (waste, risks, irrigation, technification and temporality Agriculture, industrial and agricultural activities, transit areas, planted areas, customs, culture, migration, employment and tourism) of the Río Verde, in relation to the evaluation and projection of environmental flows (for the dry and wet season) as a measure of Management and mitigation of environmental impacts in the "Paso de la Reina" dam project were considered. The recommended ecological flows in (m³ / s) were: Extreme Low Flows from 12.75 to 30.0; Small Flows from 32.1 to 70.15; High Flows from 150 to 260; High Flow Pulses from 350 to 500; Small Floods 548.52 to 1000 and Large Floods from 3000 to 4000. Flow strategy covering frequency characteristics, length of time to maintain hydraulic conditions, channel geometry, sediment types, water balance at the mouth, and distribution of terrestrial and aquatic organisms along the river. The consequences of partial or total alteration of the environmental flow components are described. Likewise, the multidisciplinary analysis generated the environmental flow scenarios, in relation to a certain condition of ecological status for the river and the analyzed species, as well as the impact assessments, mitigation measures and management plans of the Rio Verde basin.

Key words: catchment management, potamology, environmental impact.

1 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. rebeca_gonzalez@tlaloc.imta.mx.

1. INTRODUCCIÓN

Acorde con el Inventario Nacional de la Calidad del Agua de USA, los ríos soportan múltiples usos, que incluyen el suministro de agua para consumo humano, la pesca, la recreación, la agricultura, así como la prevención y control de la corriente y la erosión, donde la sedimentación y el exceso de nutrientes son las causas más significativas de la degradación del hábitat para la vida silvestre en un 44% (Komar 1976; Fisher y Kumer 2000; Dyson et al. 2003). Con el tiempo los efectos acumulativos en los cambios del entorno dan como resultado variaciones significativas en los ríos, en los corredores fluviales y en los ecosistemas asociados, que se manifiestan en la degradación de la calidad del agua, en el decremento en la capacidad de almacenamiento, en la pérdida de hábitats para los peces y la vida silvestre y en el deterioro del valor recreacional y estético (Gustard, 1992; Arthington, 2000; FISRWG, 1998; Gafny et al., 2000; Jungwirth et al., 2000; Brown & King, 2003a).

El ambiente es tratado como un aspecto marginal, y en la actualidad es la clave para el manejo sostenible del agua. El ambiente representa un tipo especial de usuario del agua y en muchos aspectos constituye la parte central del manejo de los recursos acuáticos, puntos que se consideran como críticos para el desarrollo y salud de las poblaciones, la reducción de la pobreza, en la productividad agrícola, industrial y energética, y para el desarrollo sostenible de las comunidades aledañas a los ríos. Las estrategias ambientales deben de enlazar y balancear los intereses entre el manejo sostenible del recurso acuático, sustentabilidad ambiental y pobreza (Dyson et al., 2003; Arthington y Lloyd, 1998; Tharme, 2003; Lytle & Poff, 2004).

Para el manejo integrado de las cuencas se requiere un enfoque holístico consistente en la participación de muchas disciplinas, en donde cada especialista utiliza los métodos de su elección para desarrollar una relación caudal – ecosistema entendible, con la finalidad de generar un marco de conocimiento ambiental, social y económico general asociado al análisis del régimen de la frecuencia y duración de los diferentes flujos que son necesarios para mantener la estructura y función del río, aspectos que representan el fundamento para el manejo integrado de las cuencas (Bunn & Davies, 2000; Poff et al., 2009). En la metodología DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformation o Respuesta Aguas Abajo por las Transformaciones Impuestas al Caudal), desarrollada en Australia y África del Sur, un equipo multidisciplinario identifica las consecuencias de reducir las descargas naturales de los ríos con un tipo particular de característica o función biofísica (hidrológica, hidráulica, etc.), en términos de deterioro de la condición del sistema fluvial y se establecen ligas entre las consecuencias de tipo social (subsistencia de los usuarios), evaluadas a través de implicaciones ecológicas,

geomorfológicas y económicas compensación y mitigación (King et al. 2000; Brown y King 2003b,c; Bunn y Arthington 2002; Arthington et al. 2006).

La metodología DRIFT aborda todos los aspectos del sistema fluvial, a través de escenarios y proporciona a quienes toman decisiones, una serie de opciones de regímenes de caudal proyectados con los posibles cambios en la condición del río (Brown y King, 2003a). La metodología DRIFT considera cuatro módulos: 1) **Biofísico**. Estudios del ecosistema fluvial (físicoquímicos y biológicos) relacionados con el caudal, para predecir los cambios del ecosistema en respuesta a las variaciones del caudal; 2) **Socioeconómico**. Estudios sociales de los recursos del río, utilizados para la subsistencia de los usuarios, los perfiles de salud de la población y el estado de los recursos agropecuarios en relación con el caudal, para predecir las afectaciones con los cambios en el caudal (estimación de costos); 3) **Desarrollo de escenarios**. Para cada uno de los regímenes futuros de caudal se describen los cambios previstos en la condición del ecosistema fluvial, el impacto ambiental en relación con la subsistencia de la población y el régimen de propiedad; 4) **Economía**. Se calculan los costos de compensación de cada escenario para los usuarios. Una evaluación macro-económica de cada escenario, para describir sus implicaciones regionales más generales en cuanto a desarrollo industrial y agrícola, costo del agua para áreas urbanas y un proceso de partición pública, en el que las partes interesadas pueden expresar su nivel de aceptación de cada escenario (Brown y King, 2003a, 2003b y 2003c).

El enfoque holístico requiere de un equipo multidisciplinario (geógrafos, geólogos, hidrólogos, hidráulicos modeladores de la hidrodinámica, geomorfólogos fluviales, limnólogos, botánicos, ictiólogos, ecólogos de invertebrados acuáticos, más el conocimiento básico de sedimentología, plancton, herpetofauna, mamíferos dependientes del agua, vida silvestre terrestre y microbiología acuática, antropólogos y agrónomos, entre otros), para generar los estudios de la composición, estructura y función del río de interés, desarrollo y uso de escenarios, así como la capacidad predictiva de como el río puede cambiar si el régimen de caudales cambiara como lo señalan Reynolds (1993), Richter (2006) y Poff et al. (2009). La severidad de la respuesta a cualquier cambio puede deducirse del análisis de las variables evaluadas en el ecosistema, por lo tanto es necesario: a) generar los escenarios con los posibles cambios físicoquímicos y biológicos observados, y las proyecciones o predicciones de las variables del ecosistema que podrían responder a los cambios en el caudal (indicadores de cada disciplina), b) identificar los componentes o categorías del régimen de caudales preponderantes en el mantenimiento del ecosistema fluvial (caudales extremos bajos, caudales bajos, caudales altos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones,

grandes inundaciones), c) describir como los cambios predichos pueden afectar las características de los usuarios de las comunidades rurales aledañas al río, d) analizar las comunidades que utilizan el río, para que los tomadores de decisiones puedan utilizar la información en la implementación de un caudal ambiental o caudal ecológico (King et al., 2000; Dyson et al., 2003; Dabos y Hirji, 2003; Richter et al., 2006; TNC, 2006; Poff et al., 2009). Posteriormente, se requiere de modestos programas de monitoreo para cuantificar los posibles cambios a través del análisis del estado del sistema a lo largo y ancho del río (indicadores). La utilización de mapas GIS cada 3 ó 5 años en relación al caudal del río para medir los cambios sedimentológicos, geomorfológicos o físicos del hábitat y la diversidad. Los caudales ambientales deben de ser considerados en combinación con otras medidas de mitigación complementaria, como la calidad del agua (García de Jalón, 1995; King & Brown, 2003; Dyson et al., 2003; Poff et al., 2009). Las metodologías holísticas son útiles en el análisis de la información biofísica, social y económica, por lo tanto son una herramienta que facilita la planeación y el ordenamiento territorial, así como la cuantificación del impacto ambiental y el manejo integrado de las cuencas (King et al., 2000; Tharme, 2003; King & Brown, 2006, González Villela & Banderas, 2015).

Se han realizado una serie de encuentros sobre Caudales Ambientales en Costa Rica, Argentina, Panamá, Colombia y México, así como congresos sobre agua y ambiente en donde el tema de caudales ambientales ha tenido un lugar destacado. Sin embargo, debe reconocerse que el proceso de implementación de estos conceptos es aún incipiente y su grado de desarrollo muy dispar entre los distintos países y aún dentro de ellos mismos. En Chile, son insuficientes las acciones vinculadas al monitoreo y solo se cuenta con información hidrológica. En Ecuador hay voluntad de abordar el tema, pero hasta el momento la definición del caudal ecológico se limita a una condición de tipo hidrológica. En Perú la normativa vigente no obliga a las hidroeléctricas a aplicar el caudal ambiental. Uruguay, Argentina, Ecuador, Brasil, Costa Rica, Chile, Perú y México han aplicado algún método de caudal ambiental. Argentina ha aplicado la metodología DRIFT en algunos ríos. En países en vía de desarrollo (Latinoamérica), la implementación de caudales ambientales ha sido limitada y en la mayoría de los casos no ha contribuido a aliviar la pobreza y a garantizar una mejor calidad de vida de los actores involucrados (Schreider et al., 2017).

En el presente estudio se aplican al río Verde (Oaxaca), la metodología holística DRIFT y otros cuatro métodos de cálculo del caudal ecológico, para: 1) la cuantificación y la determinación de las estrategias de los regímenes de caudal, 2) para generar los escenarios e indicadores de impacto en los módulos biofísico y socioeconómico, y 3) para proponer las medidas de mitigación y seguimiento

con los caudales propuestos en el proyecto hidráulico de usos múltiples Paso de la Reina del río Verde (Oaxaca). Estudio patrocinado por la Comisión Federal de Electricidad, con la finalidad de generar un manejo integrado de la cuenca y lograr mantener el equilibrio y la función del sistema fluvial con la operación de la presa "Paso de la Reina". El río actualmente mantiene condiciones semi-prisitinas.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Verde se encuentra localizada al sureste de la República y al sur de la Región Hidrológica No. 20 (RH20) "Costa Chica Río Verde", en las coordenadas geográficas 16° 05' 36.61" N y 97° 47' 10" O, con una longitud de 600 km. El máximo de elevación en la cuenca es de 2600 m. El río nace al noroeste de la ciudad de Oaxaca con el nombre de Atoyacy descargar sus aguas en el Pacífico, tiene una superficie de 1,122.71 km² (CFE, 2008). La cuenca está caracterizada por tener climas secos en la parte alta. En la parte media y baja se presentan climas lluviosos con temperaturas semicálidas y cálidas (Figura 1). Los afluentes principales por la margen derecha del río son: Río Reyes, Sola de Vega, San Jacinto, Zonzotepec, Yolotepec Cuanana y Sordo; y los afluentes por la margen izquierda son: Tlacolula, Ejutla, Miahuatlán, Coatlán y Juquila. El río es susceptible a un proceso continuo de erosión/sedimentación ante el patrón de escurrimientos generados en la cuenca. En los primeros 20 km predominan las gravas sobre el cauce principal con arenas en las márgenes. Los primeros 10 km el río está confinado por la topografía lo que impiden que el río se mueva horizontalmente, una vez que el río deja la zona de montañas, el ancho del cauce y zona inundable empieza a crecer hacia aguas abajo, para tener un cauce anastomosado o trenzado con dos o más canales. De este punto hasta la desembocadura, se mantiene el dominio de las arenas en el centro del cauce, con presencia de algunas gravas y material más fino hacia las márgenes. Con la presencia de la presa derivadora, la configuración del río hacia aguas abajo ha cambiado con el tiempo y ha pasado de ser un tramo recto a tramo con meandros, oscilando transversalmente. En la zona alta, el cauce está encañonado con un gasto de 1000 a los 1200 m³/s y los tramos de transición con 745 m³/s a 555.7 m³/s, con un caudal medio máximo de 462.6 m³/s en septiembre, un caudal medio mínimo de 26.0 m³/s en abril y un caudal máximo histórico de 7000 m³/s (junio de 1974). La vegetación dentro del Sistema Ambiental Regional (SAR) está constituida por bosque caducifolio (34%), bosque de coníferas (32.4%), pastizales (13.3%), agricultura de temporal (12.5%), agricultura de riego (2.4%), cuerpos de agua (2.0%), hidrofitas (1.9%), bosque mixto (0.7%), humedales (0.6%) y asentamientos humanos (0.2%). Las especies de peces colectadas pertenecen a 5 familias, Characidae, Mugilidae, Poeciliidae, Cichlidae y Gobidae, de las 8 especies

capturadas, sólo *Poeciliopsisgracilis*, puede ser considerada como introducida, por lo mismo el río se considera semi-prisitino. Las comunidades de macroinvertebrados están dominadas por acociles y caracoles diádomos (especies que a lo largo de su ciclo de vida migran de agua dulce a agua salada o viceversa). La diversidad natural de las diferentes zonas (humedales, corredor fluvial y estuarios) del Río Verde soportan una amplia variedad de flora y fauna (Ruíz et al., 2008). A lo largo del río

se conservan los caudales naturales. Sin embargo, una derivadora y un bordo de protección a ambos lados del río en la parte baja (24.20km), fueron construidos por CONAGUA en 1994 para ampliar las zonas agrícolas. Los estuarios soportan numerosas actividades que contribuyen a la economía de la región, como la agricultura, desarrollo urbano, turismo así como la pesca comercial y turística del Parque Nacional Laguna de Chacahua (Ruiz et al., 2010).

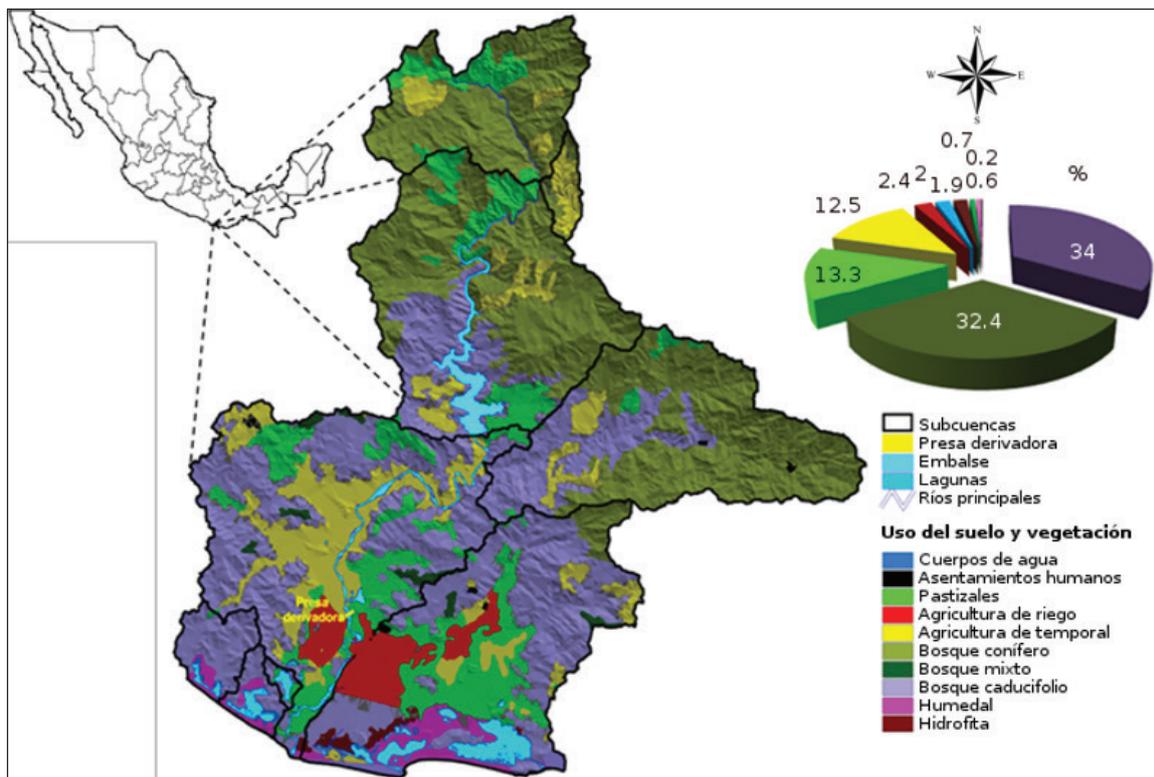


Figura 1. Hidrología, uso del suelo y vegetación para la cuenca del río Verde, Oax. (escala 1:250,000 - Serie III, INEGI, imágenes Landsat ETM 2000 y 2002, respaldada con trabajo de campo 2002, 2003 y 2004; modificada de CFE, 2008).

3. MÉTODOS

Los registros hidrométricos de 46 años (1960 – 2006) de flujos naturales para el cálculo de los caudales ecológicos dentro del SAR fueron obtenidos de las estaciones hidrométricas: El Carrizo (20021) y Paso de la Reina (20017) del río Verde (Oaxaca), controladas por la Comisión Federal de Electricidad y por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), respectivamente. La información geográfica digital de la hidrología, topografía, uso de la tierra, tipo de vegetación y suelo de la cuenca se obtuvo a través de imágenes de alta resolución supervisadas (QuickBird y LANDSAT ETM). Los análisis hidrológicos históricos de siete estaciones hidrométricas aplicando el criterio del World Meteorological Organization (OOM, 2015) y del software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS V-4 2008). La disponibilidad de agua subterránea a través de análisis isotópicos de $^1\text{H}_2$, ^2H , ^3H , ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , usando el Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW 2015), el espectrómetro de masas para

deuterio y el ^{18}O , el enriquecimiento electrolítico y el conteo de centelleo líquido para la cuantificación del tritio ambiental del agua de los piezómetros de la cuenca. Los modelos hidráulicos a través de imágenes LANDSAT, los métodos y los softwares de Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (HEC-RAS V-4.0 2008), Hydrologic Modeling System (HEC-HMS V-4.0 2008) y FLO-2D (2009). La calidad del agua incluyó el análisis de O_2 (mg/L), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), turbidez (NTU), alcalinidad (mg/L), pH, salinidad (mg/L), conductividad (μS) a través de una sonda multiparámetro YSI – 600. Los registros en campo y la contaminación difusa a través de las técnicas de laboratorio (APHA 2005) y las metodologías de Qual2K model V 2.07 (Ávila et al., 2014), la ecuación USLE (1986), ArcView Generalized Watershed Loading Function y el Canadian Water Quality Index (CCME WQ 2001). Los estudios de peces, macroinvertebrados y la ecología de la vegetación acuática y terrestre a través de la

preferencia de hábitat, simulación del hábitat y análisis multivariados (Análisis de Agrupación y Componentes Principales). La participación del panel de expertos (hidrólogos, hidrodinámicos, geólogos, geógrafos, limnólogos, zoólogos, ictiólogos, botánicos de vegetación acuática, terrestre y manglar de diversas instituciones) utilizando modelos conceptuales para los módulos biofísicos y socioeconómico para relacionar las categorías de caudales a la morfología del canal, a la hidráulica, zona de inundación y estado ecológico del sistema ripario. El módulo socioeconómico fue desarrollado por agrónomos, sociólogos y antropólogos utilizando entrevistas directas y estandarizadas a los agricultores, granjeros y propietarios en relación con los requerimientos de agua proporcionada por la CONAGUA, la información estadística del uso del suelo y características edáficas utilizando el World Soil Resource Reference-WSRR methodology (FAOUN 2014), y para cada disciplina una lista de aspectos de estudio e indicadores de impacto generados para la evaluación del sistema. El cálculo de los caudales ecológicos por el Método de Tennant Modificado (García et al., 1999), Hidroperiodo (IHA, Indicadores de la Alteración Hidrológica; TNC, 2006), Preferencia de Hábitat (multivariados;

González-Villela, 2007) y Simulación del Hábitat (PHABSIM, Physical Habitat Simulation System basado en el análisis de la velocidad de la corriente, profundidad, nivel de la superficie libre del agua y tipo de vegetación a través de un modelo unidimensional utilizando la ecuación de Manning; Hardy et al., 1997). Los métodos se seleccionaron considerando que los métodos hidrológicos son fáciles y rápidos de aplicar y pueden ser utilizados en las fases tempranas del manejo integral y adaptativo de las cuencas. Los análisis del hábitat y simulación del hábitat aunque difieren unos de otros por los objetivos de estudio y la forma en que se obtiene la información de las variables involucradas, son útiles por el enfoque, las escalas de aproximación y la información que proporcionan a diferentes niveles. La metodología DRIFT aborda los aspectos biofísicos y socioeconómicos del sistema fluvial, a través de escenarios y proporciona a quienes toman decisiones, una serie de opciones de regímenes de caudal proyectados con los posibles cambios en la condición del río (Ruiz et al., 2010; González Villela & Banderas, 2015). La Tabla 1, señala los atributos y variables relevantes para el análisis de los indicadores de impacto ambiental evaluados por cada disciplina que la metodología DRIFT requiere.

Tabla 1. Atributos en cada módulo y disciplina para la evaluación del impacto en el caudal ecológico del río Verde (Oaxaca)

MÓDULO BIOFÍSICO
<p>Información geográfica espacial digital - Topografía, tipo de suelo, hidrología, pendiente, vegetación.</p> <p>Hidrología - Caudal medio mensual, caudal medio diario, caudal mínimo y máximo diario, evaporación.</p> <p>Hidrodinámica - Características del caudal, dimensión del canal, forma, perfiles y patrones, conectividad con la zona de inundación, cuantificación del ensanchamiento y/o deposición, erosión lateral del canal, modificación de los bancos de aluviones, generación de meandros.</p> <p>Calidad del agua - Fisicoquímicos (O₂, pH, SDT, SST, temperatura, aceites, conductividad, metales, salinidad, turbidez, materia orgánica, etc.), toxicidad, coliformes.</p> <p>Caudales ecológicos - Grupo de caudales (6). Alteración en la frecuencia, duración, magnitud, periodicidad y tasas de recambio, tamaño y forma del río, niveles de la superficie libre del agua, duración anual de los caudales, descargas totales anuales y mensuales, alteración hidrológica, regulación del caudal, volumen para el mantenimiento del ecosistema, balance óptimo en el régimen de caudal, preferencia del hábitat (peces y macroinvertebrados), simulación del hábitat (peces y macroinvertebrados).</p> <p>Peces y macroinvertebrados - Decrecimiento en la diversidad, hábitats, especies nativas, especies indicadoras, incremento de especies amenazadas o en peligro, incremento en la pérdida de especies, generación de barreras para la migración, desarrollo de especies exóticas, generación de puntos estrechos o poco profundos, fragmentación del hábitat acuático, cambio de hábitat de las especies acuáticas, deposición de descargas hipolimnéticas, alteración en la cantidad de agua estacional que requiere la comunidad de peces.</p> <p>Vegetación de la ribera, hidrófitas y bosque de galería - Tipo de comunidad, distribución sobre la ribera, cubierta vegetal y dosel, dinámica de la comunidad y sucesión, reproducción, ciclos de vida, conectividad, pérdida de zonas con dosel o cubierta vegetal, usos de la tierra que generan impactos sobre el corredor fluvial, pérdida de vegetación de distintas comunidades, fragmentación de corredores de vegetación silvestre, reducción de hábitats de vegetación silvestre, plantas utilizadas por la población, suministros de agua, deposición de desechos, cantidad de agua estacional que requiere la vegetación para su conservación, nivel de la superficie libre del agua estacional que requiere para su conservación.</p> <p>Aguas Subterráneas - Almacenamiento de agua del acuífero, balance de agua. Calidad del agua</p> <p>Manglares - Estructura y función de la comunidad.</p>
MÓDULO SOCIO-ECONÓMICO
<p>Usos del suelo - Desechos por agricultura, agricultura de riego, de temporal, de goteo y tecnificado; actividades agropecuarias, zonas de tránsito, superficie sembrada, riesgos agrícolas, temporalidad de las cosechas, tipos de irrigación, tecnificación de las cosechas, zonas de tránsito, actividades industriales, superficie sembrada, costumbres, cultura, migración, empleo.</p>

Las causas y efectos relativos entre los factores de estrés y los indicadores clave, cambios temporales en el uso de la tierra y tipos de cubierta vegetal con la presencia de factores antrópicos en el área de la Cuenca del Río Verde (Oaxaca), fueron evaluados utilizando los sistemas de información geográfica (GIS), así como la información obtenida de otras disciplinas a través del análisis de: 1) indicadores de impacto sugerida por cada disciplina, 2) estado

actual del indicador, 3) tendencias y escenarios con los cambios de caudal, 4) evaluación del impacto a través de la ecuación (1), y 5) medidas de mitigación para cada indicador y disciplina, acorde con la metodología sugerida por Bojórquez (1989), Bojórquez-Tapia (2005), Cloquell-Ballester al., (2007) como se indica en la Tabla 2. Atributos directamente relacionados con los enlistados en la Tabla 1.

Tabla 2. Ejemplo de Matriz de datos (caudal ecológico) para la evaluación de los indicadores de impacto (tendencia, pre-impacto, post-impacto acorde con la ecuación 1, y estrategias de mitigación para cada atributo en cada disciplina

Componentes	T	Pre-impacto	Post-impacto	N	I	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MO	IMPAC	ESTRATEGIA MITIGACIÓN
C. extremos bajos	↓	Naturales	Desaparecen	-	12	1	2	4	4	4	4	4	4	4	-68	Caudal ecológico
C. bajos	↓	Naturales	Alteración / frecuencia periodicidad y magnitud	-	2	2	2	4	2	2	2	2	4	2	-30	Caudal ecológico
C. altos	↓	Naturales	Alteración en secas	-	3	2	2	4	3	2	3	3	3	2	-35	Caudal ecológico
Pulsos de caudal alto	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico
	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico
Pequeñas inundaciones	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico
Grandes inundaciones	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico

$$IA = \pm (3I+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC) \quad (1)$$

Donde:

IA	Impacto Ambiental.
N	Naturaleza.- Benéfica o perjudicial (±).
I	Intensidad.- Grado de incidencia (máximo valor 12).
EX	Extensión.- radio de 10 km = parcial. Extenso = para una o varias comunidades (SAR). Crítico = todo el Sistema Ambiental Regional.
MO	Momento. Plazo de manifestación del efecto.
PE	Persistencia. <1 año = fugaz; 1 y 10 años = temporal; más de 10 años = permanente.
RV	Reversibilidad.- Posibilidad de reconstrucción.
SI	Sinergia.- Reforzamiento de efectos simples.
AC	Acumulación.- Incremento progresivo.
EF	Efecto.- Directo-primario, indirecto-secundario.
PR	Periodicidad.- Intermitente o discreto, periódico o estacional.
MC	Recuperabilidad (+); Irrecuperabilidad (-).

Los impactos fueron marcados en mapas de la región de estudio utilizando una escala de severidad de la respuesta con valores que pueden estar dentro del rango de 13 a 76. Esta evaluación de impactos fue obtenida con la formula (1) y puede indicar el abatimiento del estado de salud del ecosistema fluvial cuando el resultado es alto, en relación con la escala de color y símbolos en el mapa del área de la cuenca (azul = muy buena condición del sistema- ☆; verde

= buen estado- ▲; amarillo = aceptable- ♀; naranja = deficiente- ± y rojo = mala condición- X). Los impactos pueden ser positivos o negativos en relación con la definición de cada elemento de la ecuación (1) y Tabla3. Cada impacto fue emitido por cada experto a través de una evaluación "atributo por atributo", tomando en consideración la consistencia en las evaluaciones (desviación estándar evaluada por cada experto) y consenso (grado de acuerdo entre los interesados) en

forma similar a la metodología multicriterio utilizada por Bojórquez-Tapia et al. (2005) y metodología DRIFT señalada por Brown y King (2003a, 2003b y 2003c). Los ajustes finales fueron trasladados a valores numéricos (evaluación efectuada por los expertos) para facilitar la significancia de las evaluaciones.

Tabla 3. Condición del sistema fluvial a través de la evaluación del impacto (ecuación 1)

Estado del Sistema	Color Asociado	Símbolos	Valor Numérico del Impacto	Signo
Muy buena	Azul	☆	13 - 26	+ , -
Buena	Verde	🌲	27- 39	+ , -
Aceptable	Amarillo	📌	40 - 52	+ , -
Deficiente	Naranja	±	53 - 65	+ , -
Mala	Rojo	X	66 - 76	+ , -

Las evaluaciones de impacto en el área de estudio se efectuó considerando varios segmentos, con base en los cambios en la estructura del río en el plano longitudinal por el cambio en el ancho y profundidad río abajo debido al incremento del área de drenaje y descargas, de la siguiente forma: 1) área que será inundada por la presa, caracterizado por presentar altas pendientes cortadas a tajo en forma de V dentro del valle, con presencia de rápidos y cascadas; 2) segmento de la Presa de Cambio de Régimen (PCR), caracterizado por presentar pendientes empinadas, alta erosión de sedimentos por las altas pendientes en el área de la cuenca y la influencia de la precipitación; 3) de la PCR a la derivadora (Ricardo Flores Magon, RFM) o zona de transferencia que recibe material erosionado, caracterizado por una zona de inundación amplia y patrones meándricos en el canal del río; 4) de la derivadora (RFM) a la desembocadura del río, con poca elevación, meandros y un valle plano con una zona de deposición como proceso dominante; 5) La laguna de Chacahua ubicada a cinco km de la desembocadura en la margen izquierda; 6) Las lagunas del Espejo y Minuyua ubicadas a 1.47 km de la margen derecha del río; y 7) La confluencia del Río La Leche - Río Verde en la parte alta, y considerado solamente por algunas disciplinas (Figura 2).

4. RESULTADOS

El valor del caudal ambiental para años secos y húmedos se efectuó utilizando los diferentes rangos de caudales proporcionadas por la aplicación de las cuatro metodologías mencionadas, con el propósito de obtener márgenes de operación o de manejo de la presa cuando las condiciones ambientales generen años secos (valor más bajo del rango en el grupo de caudales) y los años húmedos (o valor más alto para

cada grupo de caudales, Tabla4); valores de caudal que se obtienen de forma diferente según sea el método utilizado.

Tabla 4. Caudales ambientales calculados a través del Método de Tennant Modificado, IHA, Preferencia de Hábitat y Simulación del Hábitat y los rangos de caudal para el manejo de la presa en años secos y húmedos

Grupo	Caudal (m³/s)	Duración y época
C. Extremos Bajos	12.75 – 30.0	15 días en abril.
Caudales Bajos	32.1-70.15	Noviembre - mayo.
Caudales Altos	48.15 - 260	Junio - octubre (alternar Pulsos de C. Altos)
Pulsos de Caudal Altos	350 – 500	Julio y agosto (5 – 15) los 1ros., días de septiembre
Pequeñas Inundaciones	548.52 – 1000	Durante septiembre
Grandes Inundaciones	3000 – 4000	1ros. días de septiembre (3ero. o 5to. día).

El propuesto esquema para los caudales ambientales es producto de la información generada por los cuatro métodos de caudal ecológico aplicados (Tennant, IHA, de Habitat y PHABSIM), que constituyen parte de la información del módulo biofísico (hidrología, topografía, uso de la tierra, tipo de vegetación y suelo, clima, hidrometría agua subterránea, hidráulica, calidad del agua, contaminación difusa, estudios de peces, macroinvertebrados y la ecología de la vegetación acuática y terrestre), y socioeconómico (uso del suelo y características edáficas, población, industria, cultura, religión, ocupación, migración, costumbres, desempleo, agricultura) que requiere la metodología DRIFT, para generar los caudales ambientales consistentes con la aplicación de los análisis multidisciplinarios efectuados en relación con el comportamiento natural hidrológico e hidrodinámico del Río Verde, la conservación del agua subterránea de la cuenca, la conectividad de la zona de inundación (Lagunas Laválo, Chacahua, El Espejo y Minuyua), la calidad del agua, la disponibilidad de agua para la vegetación del corredor fluvial (bosque de galería e hidrofitas), los humedales, estuarios, comunidades de peces, macroinvertebrados y manglar, como lo señalaron los resultados de: 1) el modelo hidrológico proyectado con una descarga mínima instantánea promedio 7.4 m³/s, en abril y una descarga máxima instantánea promedio de 4065 m³/s en octubre, que es coincidente con los requerimientos de caudal ambiental calculados en el río, 2) los requerimientos hidrológicos del río (Tabla 4), que generarán las condiciones para mantener la calidad y la cantidad de los acuíferos en el área de la Cuenca (balance

con el régimen de caudales naturales actuales, los aportes de la lluvia, las actividades de irrigación, bombeo, evaporación y flujo base), 3) concordancia con el modelo hidrodinámico proyectado y las descargas de retorno, formativas, de máxima ribera, de inundación para diferentes años y diferentes segmentos del río en relación con los sistemas asociados (Lagunas) como se muestra en la Tabla 5 (Ruiz et al 2010), 4) los hábitats de las comunidades de peces y macroinvertebrados saludables como lo muestran los estudios multivariados de preferencia de hábitat y simulación del Hábitat (IFIM-PHABSIM), y 5) la conservación de las condiciones de humedad necesarias para el mantenimiento de las comunidades de flora y fauna en el cauce del río, corredor fluvial, manglar y bosque de galería a través de los picos de caudal alto, y pequeñas y grandes inundaciones proyectadas, y 6) el balance de salinidad en la desembocadura del río.

Tabla 5. Requerimientos hidrológicos de caudales para mantener las condiciones morfométricas y sedimentológicas del cauce

Evento	Caudal (m ³ /s)
Avenidas ordinarias que inundan	400 – 900
Gasto formativo	1000
Gasto formativo 1.4	900
Gasto formativo 2.0	1006.85
Gasto formativo 5.0	1406.11
Gasto de retorno 1 a 4 años	2112.87
Gastos a nivel de rivera máxima (P Reina)	900
Gastos a nivel de rivera máxima (Derivadora)	500
Gastos a nivel de rivera máxima (Desembocadura)	1000
Gastos de alimentación para la Laguna El Espejo	1000 – 1100
Gastos de alimentación para la Laguna Laválo	350
Gasto medio de desborde (Desembocadura)	455.8
Gasto medio de desborde (Huichicata)	1694.6
Avenidas por ciclones	400 – 3334
Gastos máximos de desborde-bordo de protección	4065

Como parte de la metodología DRIFT, se evalúan los impactos y se proponen las medidas de mitigación del área de la Cuenca del Río Verde (topografía, suelo, distribución de la vegetación, uso de la tierra, hidrología, hidrodinámica, agua subterránea, calidad del agua, contaminación difusa, caudales ambientales, comunidades de flora y fauna acuática y terrestre del cauce y del corredor fluvial) para los

diferentes segmentos del río, a través de la información generada previamente por cada disciplina en las matrices de datos (indicador, condición, tendencia, impacto y medidas de mitigación; Tabla 2), y para cada atributo de cada módulo señalado en la Tabla 1, como a continuación se describe (Figura 2).

MODULO BIOFÍSCO

1er. y 2do. Segmento (Presa y PCR)

Impactos. En los caudales naturales y biodiversidad. Conversión del segmento de lotico a léntico±.

Mitigación. Aplicar medidas de compensación para las áreas de inundación en relación con la conservación de la biodiversidad. Generación de invernaderos rurales de especies nativas de plantas. Estudios de investigación de las comunidades de flora y fauna. Manejo de las especies nativas de peses y alternativas.

3er. Segmento (PCR-Derivadora - 27.780 km)

Impactos. Los Caudales Extremos Bajos de 12.75 a 30 m³/s serán modificados. Los caudales medios mensuales y diarios naturales observarán un incremento en la época de secas y un decremento en la temporada de lluvias. Alteración en la frecuencia, magnitud y periodicidad de los caudales. Se alterará la calidad del agua en los primeros metros posteriores a la cortina de la PCR (O₂, temperatura y SST). 537 ejemplares de 8 especies, pertenecientes a 5 familias en la parte alta del río, y un total de 760 ejemplares de 17 familias para la parte baja señalan a la derivadora como una barrera para la migración de especies.

Mitigación. Conservación de los caudales ambientales en este tramo para mantener las características morfométricas y sedimentológicas del cauce. Protección de las márgenes del río contra la erosión a través de enrocamientos. Las hidrofítas, la vegetación acuática y ripariase mantendrán con los actuales usos de la tierra (agricultura y pastoreo), así como la conectividad. Recuperación del corredor fluvial con prácticas agropecuarias adecuadas. Por el contrario se observará una interacción benéfica en la parte baja del río en la época de secas del agua subterránea debido al incremento del caudal con la operación de la presa.

4to. Derivadora – Desembocadura (21.780 Km)

Impactos. Incremento pequeño en el almacenamiento de agua en los acuíferos debido a la influencia favorable del incremento del caudal extremo bajo en la época de secas (75m³/s). Las prácticas agropecuarias ejercerán el mayor impacto sobre las hidrofítas. Generación de barreras para la migración de especies río arriba.

Mitigación. Caudales ambientales proyectados para mantener las condiciones fisicoquímicas favorables para el desarrollo de las especies acuáticas animales

y vegetales, así como el balance de salinidad entre el mar y el río manteniendo la comunidad de manglar en la desembocadura. Construcción de canales comunicativos en la derivadora para favorecer a las especies migratorias de Macroinvertebrados (*Macrobrachium sp.*) y de peces *Agonostomus Monticola*, *Awaous transandeanus*, *Centropomus sp.*, *Oerochromis mossambicus*, *Dormitator latrifons*, *Astyanax aeneus*, *Sicydium multipunctatum*, *Gobiomorus maculatus*, *Poecilia sphenops*, *Pomadasys bayanus* y *Mugil curema*. Los caudales extremos bajos de 12.75 a 30 m³/s en este segmento pueden ser recuperados utilizando la derivadora.

5to y 6to. Segmento (Desembocadura y Lagunas)

Los caudales ecológicos mantendrán las condiciones hidrológicas de las lagunas, y el balance de agua dulce y salada entre el río y el mar.

MODULO SOCIOECONÓMICO

3ro. 4to.5to. y 6to Segmento

Impactos. Incremento de los desechos de la agricultura y subutilización de la agricultura de riego. Para la agricultura de temporal y para la agroindustria con una tendencia a permanecer como actualmente se encuentra (concesión de agua). Alteración del corredor fluvial y de la calidad del agua del río por las prácticas agropecuarias.

Mitigación. Se sugiere la formación de un corredor fluvial o protección de ribera, prácticas de manejo agropecuario adecuadas para el control de la contaminación, el funcionamiento de la planta de tratamiento para la procesadora de limón y la implementación de la agricultura orgánica para la conservación del ambiente. Transformación al riego tecnificado. Abatimiento en la agricultura de temporal por la agricultura de riego.

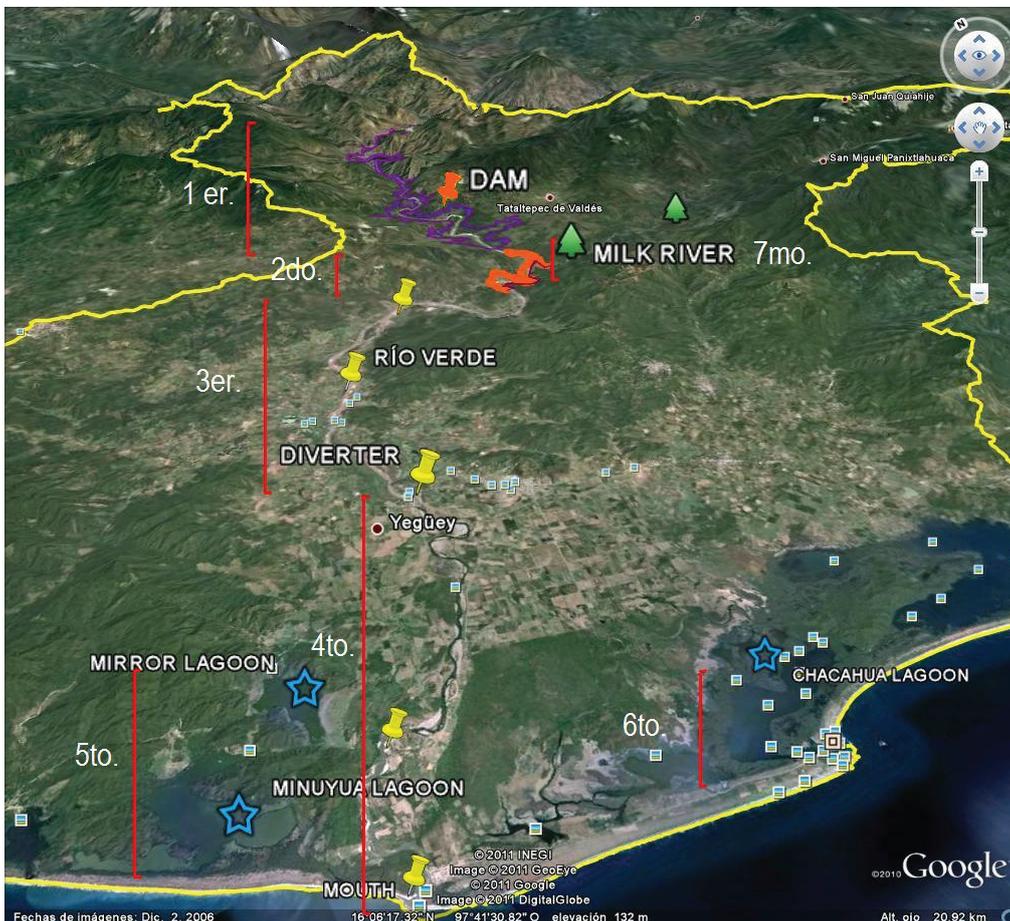


Figura 2. Cuenca y segmentos del río evaluados para la determinación de los caudales ambientales, identificación de impactos y medidas de mitigación en el Río Verde (Oax.).

5. DISCUSIÓN

El régimen de caudales ambientales obtenido a través de las cinco metodologías (Tennant Modificado, IHA, Multivariados, PHABSIM y DRIFT) para el río Verde (Oaxaca), señalaron los flujos, escenarios e impactos para mantener las condiciones hidráulicas, la geometría del canal, tipos de sedimentos en el

sustrato, el balance de agua dulce y salada en la desembocadura, así como del agua subterránea, las condiciones socioeconómicas relacionadas con los cambios de caudal para cada grupo de caudales de la estación húmeda y de estiaje (años secos y lluviosos), la distribución de los organismos

terrestres y acuáticos a lo largo del río acordes con la conservación del hábitat de especies de peces y macroinvertebrados (nivel de la superficie libre del agua, profundidad, velocidad, cubierta vegetal, pozas, charcas, remansos, rápidos) como a continuación se señala: **Caudales extremos bajos:** Por un periodo de 15 días en la época de secas (abril) de 12.75 a 30 m³/s (mínimo recomendable), para mantener un hábitat a nivel de sobrevivencia a corto plazo para la mayoría de las formas de vida acuáticas. Para que el ancho del cauce a nivel de la superficie libre del agua, la profundidad y las velocidades de la corriente no se reduzcan significativamente por mucho tiempo y para que el hábitat acuático no se degrade, como ha sido observado por Tennant (1976), Boulton (1999), Hardy (1997), en otros ecosistemas. **Caudales bajos:** O mínimos óptimos para la época de secas entre 32.1 y 70.15 m³/s, durante noviembre y mayo. Para mantener un hábitat adecuado para la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuáticas porque el ancho de la superficie libre del agua, la profundidad y la velocidad serán generalmente satisfactorias. Para que las temperaturas del agua no resulten limitantes para el desarrollo de la vida acuática en la mayoría de los segmentos del río. Para que la vida de los invertebrados no se convierta en un factor limitante en la producción pesquera. Y para que se mantengan los niveles de agua, oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua como ha sido observado en otros ecosistemas (Richter et al. 1996; Arthington et al. 2006; TNC 2006). Los estudios de preferencia de hábitat (análisis multivariado) y simulación del hábitat (IFIM-PHABSIM) para los macroinvertebrados y peces señala que las especies favorecidas con estos caudales en la parte alta del río serían *Cichlasoma trimaculatum*, *Astyanax aeneus*, *Poecilia sphenops*. **Caudales altos:** Entre 48.15 y 260 m³/s, durante la época de lluvias (septiembre) con una variación que simule la magnitud del hidropereodo para la zona de estudio. Estos caudales propiciarán la distribución de las comunidades de plantas en las charcas, planicie de inundación y humedales. Asimismo, se liberará de desechos y se propiciará el aireamiento de los sedimentos de los canales y zonas de desove. Se incrementará el acceso a los hábitats específicos para la reproducción, crianza y refugio de depredadores. Se generarán espacios para el desove y la migración. Se generarán las condiciones para cubrir las estrategias de las historias de vida y los mecanismos de comportamiento específico para cada especie (Tennant 1976; FISRWG 1998; Bunn y Arthington 2002). Las especies favorecidas con estos caudales serían *Agonostomus monticola* y *Sicydium multipunctatum*, *Awaous transandeanus*, *Astyanax aeneus*, asociados a sitios profundos, con alta concentración de oxígeno y temperaturas más elevadas. **Pulsos de caudal altos:** En época de lluvias de 350 a 500 m³/s, para la preservación de la ribera. Para generar los caudales que conservarán la forma física del cauce, incluyendo los rabiones y pozas, así como de los canales laterales del río.

Para remover sedimentos de arena, grava y rocas. Para prevenir la invasión de vegetación de la ribera dentro del canal. Para restaurar la calidad del agua después de los periodos de caudales bajos, así como de contaminantes y basura. Y para mantener las condiciones de funcionalidad de los estuarios en forma coincidente con Gustard (1992), Brown y King (2003a), Dyson et al. (2003). **Pequeñas inundaciones:** De 548.52 a 1000 m³/s, al menos cada 2 años durante septiembre para la conservación de la morfología del río, la conectividad con los humedales, canales laterales, zona de inundación, limpieza y balance de sales en la zona costera (Dabos y Hirji 2003; TNC 2006). **Grandes inundaciones:** De 3,000 a 4,000 m³/s, por 3 días cada 10 años para la conservación de los ecosistemas asociados (lagunas Lávalo y Chacahua).

Los caudales ambientales no son una descripción suficiente del estado de salud de los ríos por si solos. Los caudales ambientales deberían ser considerados en combinación con otras medidas de mitigación complementaria, tales como: evaluación de la calidad del agua en combinación con las pertinentes medidas de manejo y conservación de la cuenca (Macleod et al., 1995; Maddock, 1999; Poff et al., 2009).

La magnitud, frecuencia, duración, periodicidad de los caudales ecológicos que proporcionaron los diferentes métodos fueron similares y pueden ser utilizados para establecer un rango de caudales que ayuden a generar las estrategias de manejo para años secos y húmedos, acorde con el criterio del tomador de decisiones. Asimismo, puede corroborarse la utilidad de los métodos empleados independientemente de su complejidad.

Las medidas de mitigación que la metodología DRIFT exige, se estructuraron considerando las características del caudal natural y la posibilidad de alteración del hábitat con el manejo de la presa. Por lo tanto, se sugiere aplicar medidas de conservación de los caudales ecológicos en este tramo para mantener las características morfométricas y sedimentológicas del cauce cuando la presa comience a operar, para la protección de las márgenes del río contra la erosión a través de enrrocamientos. La compensación de especies de flora y fauna para las áreas de inundación de la zona de la presa en relación con la conservación de la biodiversidad (invernaderos rurales de especies nativas de plantas). Estudios de investigación de las comunidades de flora y fauna. El manejo de las especies nativas de peces, vegetación acuática y terrestre, así como la conectividad con los humedales. Recuperación del corredor fluvial con prácticas agropecuarias adecuadas. Mantener los caudales ecológicos recomendados para conservar el balance de salinidad entre el mar y el río, así como la comunidad de manglar en la desembocadura. Construcción de canales comunicativos en la derivadora para favorecer a las especies migratorias de macroinvertebrados (*Macrobrachium* sp.)

y de peces *Agonostomus monticola*, *Awaous transandeanus*, *Centropomus* sp., *Oerochromis mossambicus*, *Dormitator latrifons*, *Astyanax aeneus*, *Sicydium multipunctatum*, *Gobiomorus maculatus*, *Poecilia sphenops*, *Pomadasys bayanus* y *Mugil curema*. Recuperación de los caudales extremos bajos de 12.75 a 30 m³/s utilizando la derivadora. Prácticas de manejo agropecuario adecuadas para el control de la contaminación, la implementación de la agricultura orgánica para la conservación del ambiente, y la transformación al riego tecnificado,

Debe de considerarse que las presas alteran la magnitud y frecuencia de los caudales, resultando en el abatimiento de la capacidad de transporte de los sedimentos y deben de ser monitoreados constantemente para el manejo propio del río. La retención de los sedimentos y la alteración de los caudales naturales río abajo causan la pérdida y acumulación de sedimentos en la base del canal, modificando los hábitats para las diferentes especies de plantas y animales acuáticos (Komar 1976; Richter et al. 1997; Lytle y Poff 2004). Por lo tanto, se sugiere el monitoreo constate para el manejo de los sedimentos en el río como ha sido señalado por Poff et al. (1997), Arthington et al. (2006) y Richter et al. (2006) en otros ecosistemas.

La aplicación de la metodología DRIFT al Río Verde (Oaxaca), representa el uso de la técnica multicriterio como auxiliar inherente en la toma de decisiones, en los estudios multidisciplinarios a través del análisis de los módulos biofísico, social y económico en las evaluaciones del Caudal Ambiental. También esta metodología toma en consideración los beneficios y costos sociales del cambio en las condiciones del río, particularmente de los usuarios (o población en riesgo) de los recursos del río (King et al, 2000; Brown y King, 2003). Sin embargo, esta metodología no provee un caudal ambiental recomendado, más bien, genera objetivos basados científicamente en las consecuencias de los cambios de caudal para un rango de posibilidades (Poff et al., 2009). Esto permite a los tomadores de decisiones generar las estrategias para el uso racional del agua. La metodología DRIFT, es esencialmente una metodología para el manejo de los datos y para la elaboración de un plan estructurado en base a la información biofísica generada (Dyson et al., 2003; TNC, 2006). Los objetivos de manejo de la metodología DIFT incluye el abatimiento de las pérdidas de hábitat naturales, la reducción de impactos generados por las fuentes puntuales y no puntuales de contaminantes, asegurar las fuentes de agua y mejorar la eficiencia del uso del agua protegiendo los humedales, zonas de almacenamiento y la recarga de las aguas subterráneas en forma coincidente con la metodología de la evaluación ambiental, donde el proceso integrativo de identificación y evaluación del módulo biofísico, social y otros efectos relevantes del desarrollo anteriores a las evaluaciones de impacto

son utilizados para la toma de decisiones (Arthington, 2006; Poff et al., 2009).

La alteración del régimen de caudales en los ríos siempre mantendrá una condición de impacto potencialmente severa. Estos impactos pueden frecuentemente ser mitigados a través del diseño de los caudales ambientales o caudales de compensación a través de la sustitución de recursos o programas de desarrollo de las comunidades (King & Brown 2006). Acorde con De Smedt (2010), es necesario elaborar iniciativas específicas en relación con las herramientas de evaluación de los Caudales Ambientales e incluir la colaboración cercana de investigadores y tomadores de decisiones para las evaluaciones de los impactos ambientales en forma satisfactoria y para la apropiada combinación de las herramientas científicas involucradas. Iniciativas que deben incluir el dialogo entre las comunidades en la fase de formulación de objetivos ambientales. La colaboración entre los investigadores y los tomadores de decisiones involucra un enfoque que puede ser considerado de frontera al conectar la ciencia y la política en el marco del desarrollo sustentable operacional.

6. AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Eduardo Soto Galera de la Escuela de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional por su participación en la recolecta, identificación y evaluación ictiológica en el tramo de estudio del Río Verde (Oaxaca). A la Comisión Federal de Electricidad por el patrocinio del estudio de la cuenca del Río Verde, y en particular a los Biólogos Rosa Dina Yerandi y Octavio Sandoval de la CFE, por el apoyo y seguimiento efectuados durante las campañas de muestreo realizadas al Río Verde en Oaxaca. Al equipo de investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jorge Brena, Marco Mijangos y Werner Wruck por la información geográfica digital, a Juan F. Gómez por el análisis hidrológico de la cuenca, a José Alfredo González y Joselina Espinosa por el modelo hidrodinámico del Río Verde, a Miguel A. Mejía por los análisis de aguas subterráneas del área de estudio, a Dolores Olvera and Marcia Yánez por los estudios sociales, e información agropecuaria de la zona. A Javier Sánchez Chávez, Luis A. Inclán por los muestreos de las variables fisicoquímicas y calidad del agua en el Río Verde. A Jorge Izurieta y María Gómez por la ayuda en algunos cálculos del caudal ecológico. A Pedro Ramírez del Instituto de Biología de la (UNAM) por los estudios de vegetación de galería de bosque y de hidrofítas del río Verde.

7. REFERENCIAS

APHA (American Pollution Health Association). 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Ed. Washington DC, USA.

- Arthington, A.H., & R. Lloyd.(1998). *Logan river trial of the guilding block methodology for assessing environmental flow requirements*. Workshop Report. Centre for Catchment and In-stream Research and Development Natural Resources. Brisbane, Australia.
- Arthington, A.H., Brizga, S.O., Choy, S.C., Kennard, M.J., Mackay, S.J., McCosker, R.O., Ruffini, J.L. & Zalucki, J.M. 2000. *Environmental flow Requirements of the Brisbane River Downstream of Wivenhoe Dam*. South East Queensland Water Corporation, and Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University: Brisbane, Australia.
- Arthington, A., Bunn, S., Poff, L. & Naiman, R.J. 2006. "The Challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems". *Ecological Applications*, 16(4): 1311-1318.
- Ávila A.M.A., Rivera J.V., & Amaya, C.A., 2014. Calibración del modelo Qual2K V2.07 en la evaluación del impacto de cargas orgánicas en el río Frío, Santander, Colombia. Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)."Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity" July 22 - 24, 2014 Guayaquil, Ecuador.
- Bojórquez, L.A. 1989. "Methodology for Prediction of Ecological Impacts Under Real Conditions in Mexico". *Environmental Management*, 13, pp. 545-551.
- Bojórquez-Tapia, L.A., Sánchez-Colón, S. & Flores, A. 2005. "Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis". *Environmental Management* 36(3): 469-481
- Boulton, A. J. 1999. "An overview of river health assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis". *Freshwater Biology* 41: 469-479.
- Brown, C. & King, J. 2003a. "Environmental Flows: Concepts and Methods". En: *Water Resource and Environment Technical Note 1*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington D.C.
- Brown, C. & King, J. 2003b. "Environmental Flows: Case Studies". En: *Water Resources and Environment*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- Brown, C. & King, J. 2003c. "Environmental Flows: Flood Flows". En: *Water Resources and Environment*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- Bunn, S.E. & Davies, P.M. 2000. "Biological processes in running waters and their implications for the assessment of ecological integrity". *Hydrobiologia* 422/423: 61-70.
- Bunn, S.E. y Arthington, A.H. 2002. "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity". *Environmental Management*, 30(4): 492-507.
- CCME WATER, 2001. *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. User's Manual. Canadian Council of Ministers of the Environment. USA.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad. 2008. *Estudios Hidrológicos, Hidrogeoquímicos, Fluviales, Hidrodinámica Lagunar-Costera, Manejo de Cuenca y Distrito de Riego, Caudal Ecológico, Calidad del Agua Superficial y Contaminación difusa de las Lagunas de Chacahua del Sistema Ambiental Regional del Proyecto de Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples, Paso de la Reina Oaxaca (Periodo de Muestreo Julio a Diciembre, 2008)*. Convenio de Colaboración CFE-IMTA:SC-CPH-13. México.
- Cloquell-Ballester, V.A., Monterde-Díaz, R., Cloquell-Ballester, V.A. & Santamarina-Siurana, M.C. 2007. "Systematic comparative and sensitivity analyses of additive and outranking techniques for supporting impact significance assessments". *Environmental Impact Assessment Review* 27, 62-83
- Dabos, R. & Hirji, R. 2003. *Water Resources and Environment Technical Note C.1. Environmental Flows: Concept and Methods*. Series Editions. The World Bank, Washington, D.C.
- Dyson, M., Berckamp, G. & Scanlon, J. 2003. *Flow*. Editorial IUCN, UK, p. 125.
- Fisher, S. y H. Kummer. 2000. "Effects of residual flow and habitat fragmentation on distribution and movement of bullhead (*Cottus gobio* L.) in an alpine stream". *Hydrobiologia* 422/423, 305-317.
- FISRWG, (Federal Interagency Stream Restoration Working Group). 1998. *Stream corridor restoration principles, processes, and practices*. USA government.
- FAOUN (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2014. World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soil and creating legends for soil maps. FAO publications. Italy.
- River FLO-2D. 2009. *Two Dimensional Finite Element River Dynamics Model, Manual*. FLO-2D. FLO-2D Software, Inc. Nutrioso. USA
- Gafny, S., Goren, M. & Gasith, A. 2000. "Habitat condition and fish assemblage structure in a coastal mediterranean stream (Yarqon, Israel) receiving domestic effluent". *Hydrobiologia* 422/423, pp. 319-330.
- García de Jalón, D. 1995. *Management of physical habitat for fish stocks. In the ecological basis for river management*. (Eds) D. M. Harper y J. D. Ferguson. John Wiley&Sons, Chichester: 363-374.

- García, R.E., González-Villela, R., Martínez Austria, P., Athala, M. & Soldán, A.P. 1999. *Guía de Aplicación de los Métodos de Cálculo de Caudales de Reserva Ecológicos en México*. IMTA-CNA. México.
- González-Villela, R. 2007. Cálculo de caudales para la conservación del hábitat en ríos regulados por presas. En: *Bases Teóricas y Prácticas del Manejo Limnológico de las Presas Mexicanas: Hacia un Manejo Sustentable del Agua*. (Ed). Arredondo, F. J. L. Editorial. AGT.
- González-Villela R., A. Banderas Tarabay. 2015. Metodologías para el Cálculo de Caudales Ecológicos y Ambientales en Ríos Regulados por Presas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Gustard, A. 1992. "Analysis of River Regimes". (Eds). Calow and Petts. *The Rivers Handbook*, Vol. I. John Wiley & Sons.
- Hardy, T.B., S. Williamson, T.J. Waddle. 1997. *The theory and application of the physical habitat simulation system (PHABSIM)*. Midcontinental Ecological Science Center. United States Geological Survey. Biological Resources Division. Fort Collins, CO. USA.
- HEC-RAS River Analysis System. 2008. *Hydraulic Reference Manual*. Versión 4.0. marzo de 2008.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1981. Digetenal.
- Jungwirth, M., Muhar, S. & Schmutz, S. 2000. "Fundamentals of fish ecological integrity and their relation to the extended serial discontinuity concept". *Hydrobiologia* 422/423, 85-97.
- King, J.M., Thorne R.E. & De Villiers M.S. 2000. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission: Pretoria, South Africa
- King, J. & Brown, C. 2006. "Environmental Flows": Striking the balance between development and resource protection. *Ecology and Society* 11(2): 26 – 47.
- Komar, P.D. 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall: 429p.
- Lytle, D.H. y N.L. Poff. 2004. "Adaptation to natural flow regime". *Trends in Ecology and Evolution* 19: 94-100.
- Maddock, I. 1999. "The importance of physical habitat assessment to evaluating river health". *Freshwater Biology*, 46: 807-819.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial) 2012. Índice normalizado de precipitación. Guía de Usuario. OMM-No 1090. ISBN 978-92-63-31090-3. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_es.html.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Trestegard, K.L., Richey, B.D., Sparks, R.E. & Stromberg, J.C. 1997. "The natural flow regime". *BioScience* 47: 769-784.
- Poff, N.L., Richey, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.D., Freeman, M.C., Henricksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J.G., Merritt, D.M., O'Keefe, J.H., Olden J.D., Rogers, K., Thorne R.E. & Warner, A. 2009. "The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards". *Freshwater Biology*.
- Reynolds, C. S. 1993. "The ecosystem approach to water management. The main features of the ecosystems concept". *Journal Aquatic Ecosystem Health*, 2:3-8.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. & Braun, D.P. 1996. "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems". *Conservation Biology*, 10(4): 1163-1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V. & Braun, D.P. 1997. "How much water does a river need?" *Freshwater Biology* 37, pp. 231-249.
- Richter, B.D., Warner, A.T., Menyery, J.L. & Lutz, K. 2006. "A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations". *River Research and applications*, 22: 297-318.
- Ruiz, L.A. 2009. "Studies of hydrology, hydro-geochemistry, river, coastal lagoon hydrodynamic, catchment management, irrigation district, environmental flows, water quality, diffuse contamination of Chacahua lagoons of the environmental regional system of the multiple hydraulic use Paso de la Reina Oaxaca (sampling period of April – December, 2009)". "Estudios hidrológicos, hidro-geoquímicos, fluviales, hidrodinámica lagunar costera, manejo de cuenca y distrito de riego, caudal ecológico, calidad del agua superficial y contaminación difusa de las lagunas de Chacahua del sistema ambiental regional del proyecto de aprovechamiento hidráulico de usos múltiples, Paso de la Reina Oaxaca (periodo de muestreo abril a diciembre, 2009)". Proyecto TC-0957.3. Convenio IMTA-CFE. Mexico.
- Schreider, M., Paris, M. Rodríguez, E. y Indij, D., 2017. *Diagnóstico del grado de desarrollo del enfoque de caudales ambientales en países de Latinoamérica*. Informe Final. RALCEA, BID, CODIA, European Commission y Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación del Gobierno de España. Argentina.
- Tennant, D.L. 1976. *Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources*. US Fish and Wild Life Service, Montana. USA.

Tharme R. E. 2003. "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers". *River Research and Applications* 19. 397 – 441.

TNC, The Nature Conservancy. 2006. Ecological limits of hydrologic alteration. Integrating environmental flows with regional water management. *Sustainable Waters Program*. Boletín: 1 – 4.

U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1986. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release NO. 55 (2nd edition). U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

VSMOW2 - IAEA NUCLEUS - International Atomic Energy Agency. 2015. Disponible en la WEB: https://nucleus.iaea.org/rpst/referenceproducts/referencematerials/Stable_Isotopes/2H18O-water-samples/VSMOW2.htm. Consultado el 18 de abril de 2013. Um ad qui odisitatem expliti untusa digenditasit