

Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo

Recibido: 24 de octubre de 2011. Aceptado en versión final: 19 de enero de 2012.

Guadalupe de la Lanza Espino*
José Luis Carbajal Pérez*
Sergio Alberto Salinas Rodríguez**
Jorge Eugenio Barrios Ordóñez**

Resumen. El manejo diverso del agua de los ríos en México ha sido inadecuado por las diferentes actividades antrópicas, asociado a los cambios interanuales del clima y en consecuencia del patrón de sus escurrimientos, lo que ha llevado a la pérdida de los ecosistemas. Sin embargo, actualmente existen diversas metodologías para determinar el caudal necesario para conservar al medio ambiente y dentro de ellas están las de tipo hidrológicas, como la que aquí se aplica, y que se basa en una información de caudales que comprenden registros de décadas que en el país no siempre se cuentan. Por lo anterior, esta contribución compara registros de escurrimientos de diferentes lapsos de tiempo:

mínimos de 10 años, medios de 20 y más de 50 años para cuantificar el caudal ecológico. Dichos intervalos de tiempo dieron resultados semejantes, lo que significa que no sólo en el río Acaponeta sino posiblemente en otros, se puedan utilizar satisfactoriamente bases de datos de diez años. En dicho río el agua que escurre, que debe ser reservada con fines ambientales, fue para 10 años 70.1%, para 20 años 78.1% y para > de 50 años 68.8% con un 72.3% promedio del caudal total o escurrimiento medio anual.

Palabras clave: Caudal ecológico, ordinario, avenidas, volumen-reserva, río Acaponeta, Nayarit.

Measurement of the ecological flow of the Acaponeta river, Nayarit, comparing different time intervals

Abstract. The diverse management of river water in Mexico has been unequal due to the different anthropological activities, and it is associated with inter-annual changes in the climate and runoff patterns, leading to a loss of the ecosystem integrity. However, nowadays there are different methods to assess the water volume that is necessary to conserve the environment, among which are hydrological methods, such as those applied here, that are based on information on water volumes recorded over decades, which are not always available in the country. For this reason, this study compares runoff records for different time ranges: minimum of 10 years, medium of 20 years, and more than

50 years, to quantify the environmental flow. These time intervals provided similar results, which mean that not only for the Acaponeta river, but possibly for others lotic systems as well, a 10-year interval may be used satisfactorily. In this river, the runoff water that must be kept for environmental purposes is: for 10 years 70.1%, for 20 years 78.1% and for >50 years 68.8%, with an average of 72.3% of the total water volume or of the average annual runoff.

Key words: Environmental and ordinary flows, high-pulse, reserve-volume, Acaponeta river, Nayarit.

* Instituto de Biología, Circuito Jardín Botánico, Universidad Nacional Autónoma de México. E mail: gdlle@servidor.unam.mx; jcarbajal54@hotmail.com

** World Wildlife Fund (WWF) México. E mail ebarrios@wwfmex.org; ssalinas@wwfmex.org

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los ríos en México presentan un alto grado de alteración debido a las diferentes presiones antropogénicas a las que se han sometido, tales como asentamientos humanos y sus descargas, actividades agropecuarias e industriales, represas, manejo de cauces, entre otros; todo ello producto del manejo inadecuado y desordenado (Fischer y Kummer, 2000; Escobar, 2002). No obstante, a través del tiempo se ha desarrollado una serie de acciones encaminadas a revertir esta situación.

De la Lanza y García (1993) señalan que cualquier alteración hidrológica (disminución del caudal, desviaciones de cauce o canalizaciones), se identifica generalmente como el aspecto clave a considerar en la conservación o recuperación de los ríos y consecuentemente de sus humedales. Es precisamente dentro de estos cambios que se requiere enfocar a uno de los factores de estrés, que es la modificación del régimen hidrológico, que deteriora las condiciones del ecosistema. En términos generales se ha determinado que entre mayor sea la alteración del régimen hídrico natural, menor será la condición ecológica (WWF, 2009). Desde este punto de vista, el mantenimiento del caudal es uno de los aspectos fundamentales a considerar en la estabilidad de un ecosistema acuático, razón por la cual una tendencia que se ha desarrollado en los últimos años es la evaluación integral de los ecosistemas (Bunn y Davies, 2000; Schiemer, 2000; WWF, 2006), con el objeto de conocer en qué momento y bajo qué circunstancias se puede mantener su integridad ambiental. Con ese propósito, a nivel internacional se han propuesto diversas metodologías encaminadas a evaluar el caudal necesario para mantener “saludable” un determinado ecosistema acuático; dentro de esta tendencia se han desarrollado métodos hidrológicos, hidráulicos, hidrobiológicos o del hábitat y de carácter holístico (con manejo totalitario y sustentable), como sistemas integradores de los diferentes aspectos del funcionamiento de un ecosistema.

El objetivo de la evaluación del caudal ecológico se lleva a cabo con fines de conservación, restauración y manejo del ecosistema acuático, para lo cual

se proponen límites de extracción que permitan una renovación anual del recurso, empleándose como una herramienta fundamental de gestión (WWF, 2006).

La diversidad metodológica ha llevado a una complejidad de interpretaciones y consecuentemente a una heterogeneidad en la conservación ecológica. Así mismo, debido a la falta de una base de datos satisfactoria en los escurrimientos fluviales y pluviales, ha conducido a que no se aplique una metodología para medir el caudal ecológico.

Uno de los ecosistemas costeros que se ha visto amenazado por las alteraciones hidrológicas es Marismas Nacionales en Nayarit, que ha sido sometido a una serie de cambios tanto naturales como inducidos por el hombre, alteraciones drásticas que han modificado hidrogeológicamente grandes áreas, con sus consecuentes afectaciones como pérdida de una gran parte del bosque de manglar, cambios en el hidropereodo, contaminación, afectación de los recursos pesqueros de la zona, entre otros (De la Lanza y Gómez, 2010). No obstante, es uno de los sitios con mayor biodiversidad, y con un alta productividad de recursos pesqueros, características que son el resultado de los aportes fluviales e influencia marina (CONANP, 2009; De la Lanza, 2009).

El régimen hidrológico de los ríos vertientes a Marismas Nacionales es un factor de control que marca en gran medida las pautas de cambio de los ecosistemas, la importancia que representa su hidrodinámica particular (avenidas de diferente magnitud y duración, episodios de estiaje y eventos meteorológicos extraordinarios) influye en la configuración de su marco ambiental, que desarrollan un papel sobresaliente dentro de la dinámica del ecosistema. Las principales vertientes a Marismas Nacionales lo conforman los ríos Acajoneta, San Pedro y Santiago (con 1 340 hm³/año, 2 800 hm³/año y 7 000 hm³/año, respectivamente), (CNA, 2003). Es importante destacar que en los últimos años estos ríos han experimentado una disminución en su escurrimiento de magnitudes diferentes, dado el gran crecimiento poblacional, el desarrollo agropecuario y la camaronicultura, así como la construcción de presas (De la Lanza y Gómez, 2010).

De los tres ríos antes señalados, el Santiago es el más caudaloso, no obstante que sólo descarga su caudal al sur del sistema de Marismas Nacionales en épocas de grandes avenidas y es el río con la mayor alteración ambiental (PGACRPSP, 2006). El caudal del río San Pedro es el segundo en magnitud, descarga directamente a la laguna de Agua Brava y, tanto la WWF (2009) como Sánchez y Barrios (2011), calcularon el caudal ecológico para este río.

La importancia del río Acaponeta radica, en que además de ser uno de los tres ríos con el mayor aporte fluvial a Marismas Nacionales, sus aguas llegan directamente a la laguna de Agua Brava, que es el principal cuerpo lagunar de este sistema costero, y que se encuentra rodeada por diversas lagunas y esteros que actualmente tienden a modificarse en forma substancial ya que uno de sus principales problemas es la disminución del aporte de agua dulce (De la Lanza y Gómez, 2010); de ahí la importancia para calcular su caudal ecológico. La CONAGUA (2011) describe al río Acaponeta como una de las reservas potenciales de agua dulce para el ambiente costero de México. Para su conservación se ha clasificado como una de las 18 cuencas prioritarias de México, debido a la biodiversidad que sustenta (Aguilar *et al.*, 2011). Este río es de naturaleza perenne, sin embargo, la disminución tanto fluvial como pluvial, aunado a la intromisión del agua marina e incremento del azolvamiento, han ocasionando cambios drásticos en sus características ecológicas (De la Lanza y Gómez, 2010).

Marismas Nacionales ha sido considerado como uno de los sitios más biodiversos (CONANP 2009; De la Lanza, 2009), por lo que ha sido declarado, en junio de 1995, sitio Ramsar número 732 y reconocido como sitio de las Reservas de la Red Hemisférica de Aves Playeras. A partir de 1998 se ha incluido en el Programa de Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA; Bojórquez *et al.*, 2004). En mayo de 2010 una superficie total de 1 208 ha fue declarada por el gobierno de México como Área Natural Protegida (CONANP, 2010 [http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/programa_manejo.php]) con carácter de Reserva de la Biósfera.

Con base en lo anterior, esta contribución calcula el caudal ecológico del río Acaponeta tomando

en cuenta los escurrimientos entre los intervalos de 10, 20 y 56 años, con el fin de compararlos y proponer el mínimo intervalo anual que sirva en aquellos registros de ríos mexicanos que cuentan con bases de regímenes de escasos años.

ÁREA EN ESTUDIO

El río Acaponeta es uno de los más importantes de la región hidrológica RH11, Presidio-San Pedro, localizada en el extremo noroeste de Nayarit que abarca el 36.05% del área estatal, extendiéndose hacia los estados de Sinaloa, Durango y Zacatecas. Las principales corrientes que drenan la RH11 descienden del flanco oeste de la Sierra Madre Occidental y desembocan al Océano Pacífico fluyendo de norte a sur (Bojórquez *et al.*, 2004; CONAGUA, 2008; FIDERCO y UAN, 2011).

La llanura fluvio-deltaica en donde drena el río Acaponeta, está formada por los ríos Acaponeta y Cañas que desembocan en la cuenca de la laguna de Agua Brava (Figura 1).

Con base en el área de influencia y volumen de agua escurrida en la zona, la cuenca del río Acaponeta es la segunda en importancia dentro del área de Marismas Nacionales considerada como Sitio RAMSAR y Área Natural Protegida, después del río San Pedro. Cuenta con una superficie aproximada de 8 425 km² desde su nacimiento en el estado de Durango hasta el Océano Pacífico (Bojórquez *et al.*, 2004; PGACRPSP, 2006). Se inicia a partir de una elevación de 1 600 msnm y nace con el nombre de Quebrada de San Bartolo cerca del poblado de Ciénaga de los Caballos, dentro del estado de Durango, a unos 40 km al sureste de la ciudad del mismo nombre. Se dirige hacia el sur y recibe aguas abajo por la margen izquierda, uno de sus afluentes principales denominada La Quebrada Espíritu Santo, de ahí se conoce con el nombre de río San Diego hasta los límites de Durango y Nayarit que labra un profundo cauce a lo largo de unos 50 km. En el estado de Nayarit se llama Acaponeta, de la localidad del mismo nombre. En los últimos 40 km presenta una pendiente escasa y forma parte del conjunto de cuencas que desembocan en una serie de canales, lagunas costeras, manglares,



Figura 1. Ríos Acaponeta y Las Cañas. Cuenca de Agua Brava.

marismas y pantanos que pertenecen a la región costera de los Marismas Nacionales (Bojórquez *et al.*, 2004), descarga en los sistemas lagunares y estuarinos de: Agua Brava, El Valle y Las Garzas, así como los esteros: El Salado, El Indio y El Gavilán. En esta zona se sitúa una extensa área sujeta a inundación, a unas decenas de kilómetros de la playa el Novillero. La longitud del río Acaponeta es de aproximadamente 233 km desde su nacimiento hasta la barra El Novillero (*Ibid.*).

En el *Diario Oficial de la Federación* (publicación de la disponibilidad media anual conforme a la NOM-011-CONAGUA-2000) y la CONAGUA (2005) se señala que en la cuenca alta del río hasta la estación hidrométrica de Acaponeta se aporta un volumen medio anual de 1 332.9 hm³ y de esta estación a la desembocadura el volumen medio anual que se aporta es de 79.1 hm³, registrándose por lo tanto un volumen medio anual total de 1 412.0 hm³.

La extracción anual de agua superficial del río es de 26 hm³, de los cuales 22.4 hm³ se extraen río arriba hasta la estación de Acaponeta y únicamente 3.6 hm³ en la cuenca baja. Sin embargo, el volumen total anual comprometido según ese medio de información oficial, para la estación hidrométrica es de 3.4 hm³.

METODOLOGÍA

Inicialmente se obtuvo la presión del uso del agua mediante la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual de la cuenca del río. El nivel de la presión por uso del agua se definió mediante la Tabla 1.

El estado de conservación deseado se obtuvo del objetivo ambiental asignado para la cuenca, relacionando la importancia ecológica (muy alta,

Tabla 1. Presión de uso

| | | | | |
|----------------|----------|------|-------|------|
| Presión de uso | Muy alta | Alta | Media | Baja |
| | ≥80% | ≥40% | ≥11 | ≤10% |

alta, media y baja) y la presión de uso (baja, media, alta y muy alta; Tabla 2).

Para determinar el caudal ecológico del río Acaponeta se empleó un método hidrológico con alto entendimiento de la funcionalidad ecológica de los ecosistemas, que busca reproducir los elementos más significativos de la hidrodinámica de la cuenca (episodios de estiaje, avenidas y flujos máximos del caudal), considerando que estos elementos podrán mantener los atributos biológicos en niveles de calidad aceptables (WWF, 2006).

Para el cálculo del caudal ecológico se emplearon los registros de la estación hidrométrica de Acaponeta (la más cercana de este río a Marismas Nacionales), para las series de tiempo comprendidas de manera consecutiva: de 1993 a 2002 (10 años), 1983 a 2002 (20 años) y el registro completo de 56 años, obtenidos de 1946 a 2002 (IMTA, 2003).

Se definieron algunos aspectos fundamentales a considerar en esta evaluación, como son: importancia ecológica, presión por el uso del agua, objetivo ambiental y porcentaje del caudal anual recomendado para la protección ambiental. Estos elementos se obtuvieron de acuerdo con lo establecido en la Guía Rápida para la Determinación de Caudales Ecológicos (WWF, 2011).

A la serie hidrológica empleada (10, 20 y 56 años), se consideraron como regímenes naturales, debido a que en los antecedentes de la cuenca no

Tabla 2. Matriz de objetivos ambientales

| | | | | | |
|-----------------------|----------|------|-------|------|----------|
| Importancia ecológica | Muy alta | A | A | B | B/C |
| | Alta | A | B | B | C |
| | Media | A | B | C | C |
| | Baja | A | B | C | C/D |
| | | Baja | Media | Alta | Muy alta |
| Presión de uso | | | | | |

A= muy bueno, B= bueno, C= moderado, D= deficiente (tomado de González *et al.*, 2009).

se han presentado registros de alteraciones significativas del régimen hidrológico (CONAGUA, 2005; PGACRPSP, 2006; WWF, 2011).

Para calcular el régimen de caudales ordinarios estacionales de las diferentes condiciones hidrológicas (húmedas, medias, secas y muy secas) en cada registro hidrológico (10, 20 y 56 años) se organizó en años la serie de caudales medios mensuales, obtenidos a partir de los caudales medios diarios. Una vez ordenada la serie se calcularon los percentiles 75, 25, 10 y 0 para el volumen de cada mes, por ser éstos estadísticamente los representativos de las condiciones hidrológicas consideradas (húmedas, medias, secas y muy secas, respectivamente). De acuerdo con el objetivo ambiental definido para el río y al método utilizado (Sánchez y Barrios, 2011; WWF, 2011), se tomaron en cuenta las frecuencias de ocurrencia de cada condición hidrológica como criterio de ponderación para obtener el volumen anual del caudal ordinario estacional, (0.2, 0.3, 0.4 y 0.1 para años muy secos, secos, medios y húmedos, respectivamente).

El volumen total dado por los caudales ordinarios estacionales se definió a partir del volumen anual de cada condición para los 10, 20 y 56 años, multiplicado por sus correspondientes frecuencias de ocurrencia, mediante la siguiente expresión:

$$V_{tCoe} = (f_{CoeH} \times V_{CoeH}) + (f_{CoeM} \times V_{CoeM}) + (f_{CoeS} \times V_{CoeS}) + (f_{CoeMS} \times V_{CoeMS}) \quad (1)$$

En donde V_{tCoe} = volumen total del caudal ordinario estacional; f_{CoeH} = frecuencia de ocurrencia de un régimen "i"; V_{CoeH} = volumen del régimen de caudales ordinarios estacionales "i"; en donde "i" son las condiciones húmedas, medias, secas y muy secas.

Se consideró para el régimen de avenidas las siguientes categorías; intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de media magnitud, con sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio. Para caracterizar las avenidas se describió la duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio correspondiente a cada tipo de avenida. Para cada año natural (de los 10, 20 y 56 años considerados) se obtuvo el caudal máximo

diario, a partir del cual se determinó la magnitud de las avenidas, asociadas a los siguientes periodos de retorno:

Avenida con periodo de retorno de 1 año (categoría I)

Avenida con periodo de retorno de 1.5 años (categoría II)

Avenida con periodo de retorno de 5 años (categoría III)

La magnitud de las avenidas tipo o por categoría se identificó tomando los caudales máximos anuales de la serie de 10, 20 y 56 años, y realizando un ajuste con las siguientes distribuciones estadísticas; Gumbel Tipo I, Pearson Tipo III y Log Normal, mediante la obtención del promedio de la magnitud de las avenidas para los periodos de retorno indicados, sobre las diferentes series de datos considerados.

La duración representativa de las avenidas para cada categoría se obtuvo al contabilizar el número de días que se encontraron por encima de sus correspondientes umbrales; obteniendo de esta manera el momento de ocurrencia para cada categoría, al contar los meses en los que se producen.

La tasa de cambio de los caudales diarios para los eventos de avenidas se determinó separándose los días de avenidas en cada uno de los intervalos de tiempo considerados (10, 20 y 56 años). Sobre esta serie se calculó la tasa de cambio entre días consecutivos, mediante la siguiente ecuación:

$$Tc = (Q_i - Q_{i+1}) / Q_i \times 100 \quad (2)$$

En donde Tc es la tasa de cambio (%); Q_i caudal medio en un día "i"; Q_{i+1} caudal medio del día siguiente.

Para adecuar la propuesta del régimen de avenidas al objetivo ambiental, ésta se ajustó conforme a su frecuencia de ocurrencia sugerida por el método utilizado, misma que en términos anuales es: Categoría I = 0.1, Categoría II = 0.06, y Categoría III = 0.02 (a 10 años: 10, 6 y 2, respectivamente; Sánchez y Barrios, 2011; WWF, 2011).

Se calculó el volumen anual de cada tipo de avenida (categoría I, II y III) a partir del régimen

de avenidas dado para cada una, multiplicado por sus respectivas frecuencias de ocurrencia, utilizando la siguiente expresión;

$$V_{tRa} = (f_{aI} \times d_{aI} \times V_{aI}) + (f_{aII} \times d_{aII} \times V_{aII}) + ((f_{aIII} \times d_{aIII} \times V_{aIII}) \quad (3)$$

En donde V_{tRa} = volumen total del régimen de avenidas; f_{ai} = frecuencia de ocurrencia de una avenida "i"; d_a = duración de una avenida "i"; V_i = volumen de una avenida "i", siendo "i" las avenidas tipo I, II y III.

Para adoptar una propuesta del régimen de avenidas se tomó en cuenta la magnitud de las tres categorías de avenidas, así como la duración representativa de cada una; además, se determinó el momento de ocurrencia representativo de las avenidas y por último la tasa de cambio representativa de dichos eventos, seleccionando para los incrementos positivos el percentil 90 y para los negativos el percentil 10.

El cálculo detallado para estas determinaciones se llevó a cabo de acuerdo con lo indicado en la Guía Rápida para la Determinación de Caudales Ecológicos (WWF, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El río Acaponeta mantiene una corriente perenne, su escurrimiento durante el periodo del registro histórico (1954 a 2002) presentó caudales superiores a 0.5 m³/s, en el 99.4% de los registros diarios obtenidos. Actualmente presenta pocas alteraciones, por lo que se considera como caudal natural, con un escurrimiento medio anual promedio aquí calculado de 1 318.41 hm³ entre los tres intervalos de tiempo utilizados, mientras la CONAGUA (2005) ha calculado 1 336 hm³/año. En la Tabla 3 se resumen sus diferentes atributos.

De acuerdo con la CNA (NOM-011-CNA-2000), CONAGUA (2005) y con los resultados obtenidos, la presión por el uso del agua superficial para el río Acaponeta se considera escasa (2%). Se tiene concesionado y asignado un volumen anual total de agua superficial de 119 060.5 hm³ de las actividades que demandan los mayores volúmenes en

Tabla 3. Ponderación de los atributos del río Acaponeta

| | |
|---|-------------------------|
| Atributos del río Acaponeta | Ponderación |
| Importancia ecológica | Muy Alta |
| Presión por el uso del agua | Baja |
| Objetivo ambiental (estado de conservación) | Clase A |
| Naturaleza de la corriente | Perenne |
| Porcentaje recomendado del caudal para protección ambiental | ≥40% |
| Volumen de escurrimiento medio anual* | 1 336.5 hm ³ |
| Volumen anual de extracción de agua sup.* | 26.0 hm ³ |
| Volumen anual actual comprometido* | 3.4 hm ³ |
| * Volumen publicado en el estudio de disponibilidad | |

la región, que son la camaronicultura que se le ha concesionado y asignado el 84.99% de este volumen y la agricultura el 13.34% de esta agua (*Ibid.*), estas actividades son de carácter no consuntivo, por lo que eventualmente se recupera parte de este volumen, pero no así su calidad, debido a que son generadoras de contaminantes (De la Lanza y Gómez, 2010).

De acuerdo con los criterios cualitativos para fijar los caudales ecológicos en relación con el escurrimiento medio anual, se estimó que el volumen anual de agua reservado para fines ambientales se deberá mantener con una estimación mayor o igual al 40%. Se considera que este porcentaje de reserva logrará una calidad del hábitat fluvial mínimo adecuado, por lo que se decidió, con base en esa estimación y con la presión de uso actual existente, aplicar un porcentaje para los valores de referencia al régimen del caudal ecológico del río Acaponeta mayor al anteriormente señalado, siendo del 60%, condición que asegura no estar en el límite entre un objetivo ambiental clase A y B.

El promedio del Escurrimiento Medio Anual (EMA) para cada uno de los periodos considerados (10, 20 y 56 años), registraron niveles que oscilan entre 38.38 a 44.61 m³/s, con una diferencia máxima del 5%. Los caudales ecológicos promedio mensuales elegidos con base en el 60% también

mantienen una diferencia del 5% (Tabla 4). Por lo tanto, la aplicación del método hidrológico considerando los tres intervalos de años, indica que existen diferencias poco significativas entre los valores calculados con los diferentes intervalos empleados.

El río Acaponeta sigue un patrón definido en su régimen de caudales ordinarios estacionales, patrón que se observa en los tres intervalos de tiempo, así como en los diferentes tipos de años (muy seco, seco, medio y húmedo). La época de lluvias se presenta a partir de junio y alcanza su máximo en septiembre, después comienza un rápido descenso hasta noviembre o diciembre donde se presenta un incremento (posible consecuencia de las equipatas o lluvias de invierno), para posteriormente reducir su intensidad hasta alcanzar el escurrimiento mínimo anual durante mayo (época de estiaje); este patrón es similar al descrito para el río San Pedro (WWF, 2009; Sánchez y Barrios, 2011; Figura 2).

En la Tabla 5 se observa que en los meses de estiaje el régimen de caudales ordinarios estacionales bajo los diferentes años muy seco, seco, medio y húmedo en los distintos intervalos de años (10, 20 y 56 años), mostraron escasas diferencias (<7%); sin embargo, entre los distintos intervalos de años se encontraron diferencias significativas en la época de lluvias, particularmente en el mes de agosto, en donde se presentaron diferencias mayores al 30% en los años muy secos, secos y medios; lo anterior señala que es posible contar con una base de datos de 20 o 56 años para el régimen de caudales (Tabla 5).

El volumen del régimen del caudal ordinario determinado para los diferentes intervalos de tiempo (10, 20 y 56 años), presentó en los años muy secos valores heterogéneos, con diferencias hasta

Tabla 4. Promedio del Escurrimiento Medio Anual (EMA) y promedio mensual del caudal ecológico (Q_{ecol}) para los tres intervalos analizados

| Valores de referencia para régimen de caudal ecológico, porcentaje de reserva del 60%(EMA) | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Periodo | 10 años | 20 años | 56 años |
| EMA | 38.38 | 44.61 | 42.43 |
| Q _{ecol} elegido | 23.03 | 26.76 | 25.35 |

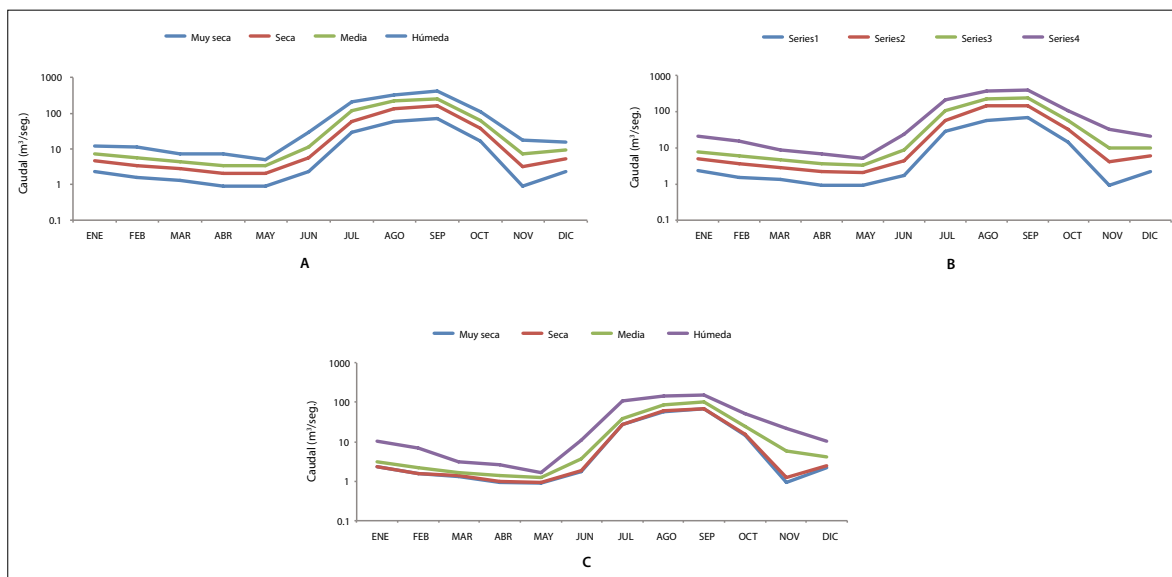


Figura 2. Régimen de caudales ordinario estacionales para A) 10 años, B) 20 años y C) 56 años.

del 41% y para los años secos, medios y húmedos los valores calculados fueron más homogéneos, con diferencias entre el 14 (años húmedos) y 7% (para años medios); por lo tanto, es posible calcular el

volumen del caudal ordinario con un lapso mínimo de diez años para los tres últimos tipos de años, sin que se presenten diferencias significativas (Tabla 6).

Tabla 5. Régimen de caudales ordinarios estacionales para el río Acaponeta, bajo diferentes condiciones hidrológicas (m^3/s) y con diferentes periodos de tiempo (10, 20 y 56 años)

| Tipo de año | Muy seco | | | Seco | | | Medio | | | Húmedo | | |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 10 | 20 | 56 | 10 | 20 | 56 | 10 | 20 | 56 | 10 | 20 | 56 |
| Enero | 2.37 | 2.37 | 2.02 | 2.41 | 2.47 | 2.56 | 2.49 | 3.06 | 3.03 | 5.06 | 13.03 | 15.77 |
| Febrero | 1.53 | 1.53 | 1.53 | 1.86 | 2.06 | 2.06 | 2.14 | 2.27 | 2.39 | 5.88 | 9.92 | 9.12 |
| Marzo | 1.34 | 1.34 | 1.13 | 1.48 | 1.52 | 1.51 | 1.56 | 1.73 | 1.79 | 3.04 | 4.01 | 3.70 |
| Abril | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 1.16 | 1.27 | 1.31 | 1.36 | 1.42 | 1.48 | 3.62 | 3.06 | 2.57 |
| Mayo | 0.90 | 0.90 | 0.88 | 1.15 | 1.17 | 1.11 | 1.22 | 1.24 | 1.28 | 1.69 | 1.83 | 1.97 |
| Junio | 2.29 | 1.76 | 1.61 | 3.30 | 2.60 | 2.06 | 5.31 | 4.37 | 3.25 | 17.29 | 14.62 | 14.78 |
| Julio | 29.05 | 27.90 | 14.76 | 29.38 | 29.38 | 32.84 | 61.92 | 47.13 | 47.94 | 89.34 | 111.04 | 103.01 |
| Agosto | 14.76 | 57.19 | 48.38 | 32.84 | 84.70 | 73.56 | 47.94 | 89.76 | 91.52 | 103.01 | 150.33 | 152.26 |
| Septiembre | 70.10 | 69.75 | 56.84 | 86.03 | 73.61 | 78.12 | 98.65 | 99.56 | 100.13 | 157.64 | 154.88 | 181.68 |
| Octubre | 16.31 | 14.83 | 7.44 | 21.09 | 18.33 | 16.18 | 23.97 | 23.22 | 25.44 | 48.85 | 53.40 | 62.82 |
| Noviembre | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 2.32 | 3.32 | 3.37 | 4.13 | 5.93 | 5.29 | 10.52 | 22.20 | 14.45 |
| Diciembre | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 3.14 | 3.58 | 3.18 | 3.71 | 4.22 | 3.88 | 5.90 | 11.30 | 10.48 |

Tabla 6. Volumen anual del régimen de los caudales ordinarios estacionales de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia para el río Acaponeta (diez años)

| Tipo | RÉGIMEN DE CAUDAL hm ³ /mes | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---------|--------|--------|
| | Muy secos | | | Seco | | | Medio | | | Húmedos | | |
| Percentil | P0 | | | P10 | | | P25 | | | P75 | | |
| Serie de tiempo- años | 10 | 20 | 56 | 10 | 20 | 56 | 10 | 20 | 56 | 10 | 20 | 56 |
| Volumen del régimen de caudal ordinario estacional (V _{Coe} -hm ³ /año) | 489.1 | 953.6 | 365.8 | 616.4 | 592.5 | 575.1 | 772.4 | 750.2 | 761 | 1195.5 | 1442.0 | 1512.9 |
| Porcentaje de Escurrimiento Medio Anual | 40.4 | 67.8 | 27.3 | 50.9 | 42.1 | 43.0 | 63.8 | 53.3 | 56.9 | 98.8 | 102.5 | 113.1 |
| Frecuencia de ocurrencia (f _{Coe}) | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 1 | | |

Tomando en cuenta los tres intervalos de tiempo y el objetivo ambiental definido para el río, catalogado como clase A (de una importancia ecológica muy alta y una presión de uso muy baja), se consideró que el tipo de régimen de caudales ordinarios estacionales que cubrirían las necesidades ambientales, tendrían la siguiente frecuencia de ocurrencia para un periodo hipotético de diez años; un año para el régimen húmedo, cuatro años para el régimen medio, tres para el régimen seco y dos para el régimen muy seco (Tabla 6).

El valor más alto del volumen total del caudal ordinario estacional (813 hm³/año) se obtuvo en el intervalo de veinte años, con una diferencia con respecto a los otros dos intervalos del 5%, por lo que cuando no se cuente con bases de datos amplias, es posible emplear registros de diez años como mínimo. El porcentaje del escurrimiento medio anual fue superior al 50% para los tres intervalos de años (Tabla 7).

Propuesta de régimen de avenidas

En la serie de caudales máximos anuales obtenidos para el intervalo de 56 años, se identificaron tres

eventos extraordinarios; el primero registrado en 1968 con el promedio más alto para el total de los registros de la estación hidrométrica de Acaponeta, con un caudal estimado en 8 909.74 m³/s, este volumen fue el resultado de las intensas lluvias que en ese año se presentaron, debido a numerosos y diversos eventos meteorológicos, como huracanes de nivel 1 y 2, así como tormentas tropicales, que incidieron en la cuenca del río (UNISYS, Weather NOAA [www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears]), los otros eventos extraordinarios ligados a este tipo de fenómenos meteorológicos se registraron en 1990 y 1993, aunque de menor intensidad superando los 4 000 m³/s (Figura 3). El registro de 1993 forma parte de los cálculos del caudal ecológico para los tres intervalos de tiempo, y solamente en el intervalo para los 56 años se consideró el registro de los tres eventos extraordinarios (1968, 1990 y 1993).

La WWF (2009) menciona que en el río Acaponeta son frecuentes las avenidas con niveles por encima de los 500 m³/s, con un patrón estacional ya descrito anteriormente. En los registros de

Tabla 7. Volumen total del caudal ordinario estacional (V_{TCoE}) de acuerdo con el balance de distribución de la cuenca para los diferentes intervalos de tiempo

| Intervalo de tiempo | 10 años | 20 años | 56 años |
|---|---------|---------|---------|
| Volumen total del caudal ordinario estacional (V _{TCoE}) (hm ³ /año) | 711 | 813 | 701 |
| Porcentaje del escurrimiento medio anual | 59 | 58 | 52 |

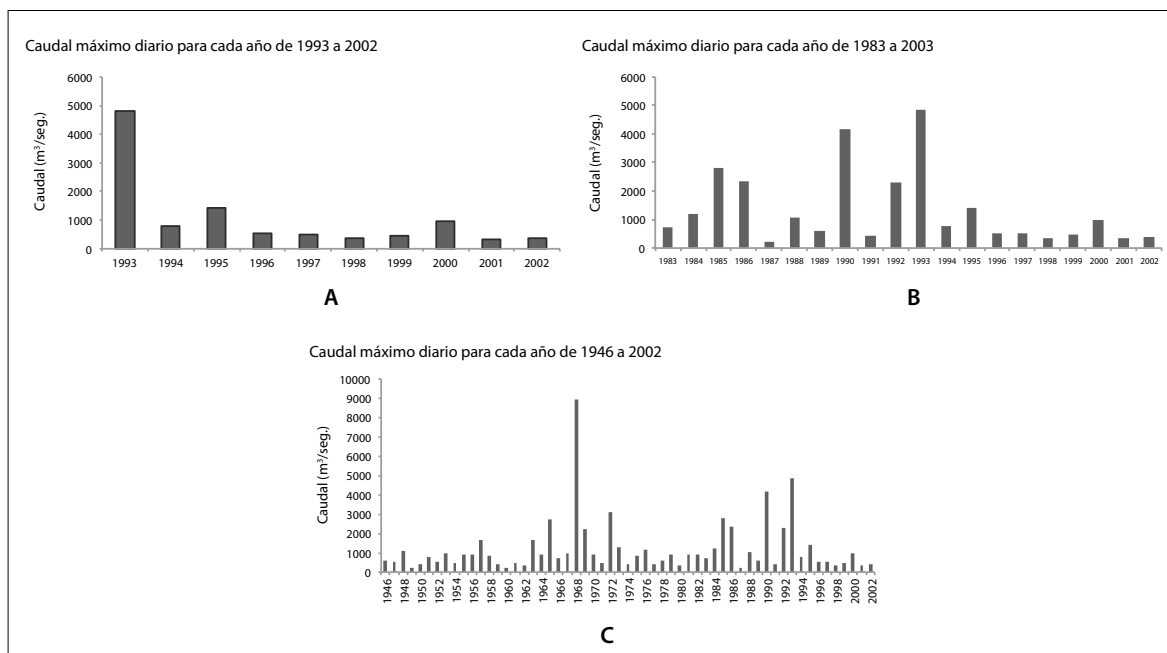


Figura 3. Caudales máximos anuales en la serie de 10 (A), 20 (B) y 56 (C) años, respectivamente.

1983 a 2002 (veinte años) el 70% de los caudales se encuentra por encima de los 500 m³/s, para el intervalo de los 10 años únicamente el 60% de los caudales diarios fue superior a los 500 m³/s. En general, cuando los periodos de tiempo son más amplios (56 años), las avenidas han estado por encima de los 1 000 m³/s en un 30% (Figura 3), por lo que el tiempo mínimo recomendable para el registro de avenidas extraordinarias es de veinte años.

La magnitud de las avenidas tipo, con base en los caudales máximos anuales de la serie histórica, se asociaron a diferentes periodos de retorno (1, 1.5 y 5 años), los cuales fueron en general heterogéneos entre los diferentes intervalos de tiempo, estimadas para los máximos y mínimos entre el 10 y 11%. Los escurrimientos máximos anuales para los periodos de retorno de 1.5 y 5 años (categorías tipo II y III) mostraron en el intervalo de 20 y 56 años diferencias que oscilan entre el 7 y 10%; mientras que en el periodo de retorno anual (categoría tipo I) el valor máximo se obtuvo en el intervalo de diez años (Tabla 8); condición que no recomienda dicho intervalo, porque no incluye el mayor número de eventos meteorológicos que incrementan el escurrimiento y por lo tanto los caudales máximos anuales.

En las tres categorías: intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de media magnitud, con sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio representativa, se observó que para la magnitud de las avenidas considerada para las intraanuales en los tres intervalos hubo una diferencia baja del 9%. En las interanuales de baja magnitud la diferencia máxima fue del 11% y respecto a las de mediana magnitud, con los mismos intervalos de tiempo, las diferencias fueron de 10% (Tabla 9).

El momento de ocurrencia representativo para las avenidas agrupa los meses de junio a octubre, que suman aproximadamente el 90% de los días en que tuvo lugar una avenida y fue consistente en los tres intervalos de tiempo.

Con base en el percentil 90, la tasa de ascenso sólo superada en el 10% de las ocasiones de los eventos de avenidas, se situó en 231, 160 y 103% en los periodos de 10, 20 y 56 años, respectivamente, lo que implica una diferencia significativa de 128% entre los periodos de tiempo de 10 y 56 años, relacionada principalmente con la diferencia entre periodos y los días consecutivos en que en éstos se presentó la avenida, por lo que para el caso

Tabla 8. Magnitud de las avenidas asociadas a cada periodo de retorno según los intervalos de tiempo utilizados

| Periodos de retorno de las Avenidas | Categoría | Magnitud m ³ /s (10 años) | Magnitud m ³ /s (20 años) | Magnitud m ³ /s (56 años) |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 año | Tipo I | 250.0 | 190.0 | 210.0 |
| 1.5 años | Tipo II | 400.0 | 570.0 | 530.0 |
| 5 años | Tipo III | 1 600.0 | 2 140 | 1 775.0 |

de condiciones de ascenso se recomienda hacer uso del periodo de tiempo más extenso disponible; mientras que la tasa de descenso (percentil 10) de las avenidas se situó en porcentajes en torno al 58-60% para los tres periodos distintos, siendo no significativa esta diferencia (Tabla 9).

El régimen de avenidas, tomando como referencia su frecuencia de ocurrencia conforme al objetivo ambiental clase A que representa este río, tanto en términos anuales como para un periodo hipotético

de diez años, calculado para los intervalos de 10, 20 y 56 años, los volúmenes totales mantuvieron una escasa diferencia en torno al 5% (Tabla 9). Lo anterior señala que los regímenes empleados a uno y diez años para calcular los volúmenes totales de los diferentes intervalos (10, 20 y 56 años) es posible utilizar los registros mínimos de diez años.

El volumen final para la reserva o caudal ecológico que se podría integrar al balance de disponibilidad de la cuenca, presentó para los intervalos de 10, 20 y 56 años, una diferencia del 4% para los veinte años, diferencia que se explica por los eventos extraordinarios registrados a inicios de los años noventa que provocaron caudales mayores a 4 000 m³/s; y una mínima para los intervalos de 10 y 56 años, cuya diferencia fue inferior al 1%, el primero por registrar el paso solo de un gran evento extraordinario (1993), y el segundo, aunque registra los tres grandes eventos, es en un periodo de tiempo mucho más extenso. En lo que corresponde al porcentaje del Escurrimiento Medio Anual para el río Acaponeta se mantuvo entre el 68.8 al 78.1%, diferencia explicable por los huracanes en la década

Tabla 9. Estimación de los atributos del régimen hidrológico para el río Acaponeta, en relación con los diferentes periodos de tiempo analizados (10, 20 y 56 años)

| Atributo del régimen hidrológico | | Categoría I intraanuales | Categoría II interanuales B* | Categoría III interanuales M* |
|---|----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Magnitud 10 años (V _a) | hm ³ /día | 22 | 35 | 138 |
| Magnitud 20 años (V _a) | hm ³ /día | 16 | 49 | 185 |
| Magnitud 56 años (V _a) | hm ³ /día | 17 | 45 | 153 |
| Momento de ocurrencia | | junio-octubre | | |
| Frecuencia de ocurrencia (F _a) | | 0.1 | 0.06 | 0.02 |
| Duración (no. de días - D _a) | | 6 | 2 | 2 |
| Tasa de cambio (%) | | | | |
| Ascenso | | Descenso | | |
| 10 años | 231 | 58 | | |
| 20 años | 160 | 59 | | |
| 56 años | 103 | 60 | | |
| V _{tra} s (10 años) (hm ³) | | 2,264 | a 10 años | 226 al año |
| V _{tra} (20 años) (hm ³) | | 2,316 | a 10 años | 232 al año |
| V _{tra} (56 años) (hm ³) | | 2,195 | a 10 años | 219 al año |

* Interanuales B = de baja magnitud; * Interanuales M = de media magnitud.

de los noventa y reflejada en el análisis del régimen de avenidas; dichos porcentajes se encuentran por arriba de lo recomendado para protección ambiental del caudal ($\geq 40\%$; Tabla 10).

CONCLUSIONES

El río Acaponeta es un caudal natural perenne, sin presión por el uso del agua en la cuenca, catalogado con un objetivo ambiental muy alto, es uno de los principales afluentes de Marismas Nacionales y es una de las reservas potenciales de agua dulce para el ambiente costero de este ecosistema, sin que hasta el momento se presenten alteraciones significativas.

La diferencia máxima entre los volúmenes finales de reserva (caudal ecológico) producto de los tres intervalos de tiempo considerados en este estudio es de un 9% y éstas, en relación con el escurrimiento medio anual, oscilan entre 69-78%, dependiendo del periodo de tiempo (cantidad de años) analizado.

El régimen de caudales mantiene un patrón de distribución semejante en los intervalos de 10, 20 y 56 años, así como en los diferentes tipos de años (muy secos, secos, medios y húmedos). Para determinar el régimen de caudales ecológicos base se recomienda emplear los registros mayores a veinte años.

Para los diferentes tipos de años (muy seco, seco, medio y húmedo) se puede calcular el volumen del régimen de caudales ordinarios con registros mínimos de diez años, con excepción de los años muy secos, debido a que en particular en este tipo de intervalo se presentaron diferencias significativas en el río Acaponeta.

El volumen total del caudal ordinario estacional calculado para los tres intervalos de tiempo no pre-

sentaron diferencias significativas, estos volúmenes representan poco más del 50% del escurrimiento medio anual, porcentaje que se considera cubriría las necesidades ambientales del río en condiciones ordinarias.

Los registros de los caudales máximos extraordinarios son factores que influyen en el cálculo para la evaluación del caudal ecológico, por lo que se considera que el tiempo mínimo recomendable para el registro de avenidas extraordinarias sea de veinte años. No obstante, en este caso en particular dos eventos extraordinarios (1990 y 1993) representaron un incremento en el volumen total del régimen de avenidas para el periodo analizado de veinte años en relación con los periodos de 10 y 56 años.

Para calcular los volúmenes totales de los regímenes empleados a uno y diez años en los diferentes intervalos (10, 20 y 56 años), es posible utilizar como registro mínimo el intervalo de diez años.

Dentro de los atributos del régimen hidrológico se obtuvieron niveles semejantes para la magnitud de las avenidas incorporadas a los tres periodos de retorno con diferencias poco significativas entre las tres categorías: intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de mediana magnitud, entre los tres intervalos de tiempo.

El momento de ocurrencia representativo para las avenidas se presentó fundamentalmente en los meses de junio a octubre para los tres intervalos de tiempo.

Para calcular el volumen final de la reserva o caudal ecológico que se integraría al balance de disponibilidad de la cuenca, se pueden emplear registros mínimos de diez años, aunque siempre será recomendable utilizar el mayor registro de años posible. El volumen final obtenido de los tres intervalos anuales fue semejante con 981 hm³/año promedio, y en los tres lapsos el porcentaje del Escurrimiento Medio Anual por arriba de lo recomendado para protección ambiental del caudal del río, el cual fue de 72.3% promedio reservado al ambiente.

Tabla 10. Volumen final de reserva anual para el río Acaponeta para las series de 10, 20 y 56 años

| Volumen final de reserva anual (Vfr) hm ³ /año | | EMA % |
|--|------|-------|
| 10 años | 938 | 70.1 |
| 20 años | 1044 | 78.1 |
| 56 años | 920 | 68.8 |

REFERENCIAS

- Aguilar, V., M. Kob, P. Kolef y T. Urkiza Hass (2011), "Las cuencas hidrográficas de México", *Diagnóstico y priorización*, pp. 142-153.
- Bojórquez Serrano, I. O. Nájera G., F. Flores V., S. Marcelaño F., R. E. González F., C. Romero B. y F. Cupul M. (2004), *Hacia la creación de un Área Natural Protegida* [<http://www.conanp.gob.mx/anp/consulta/EP%20RB%20Marismas%20Nacionales%20Sinaloa.pdf>].
- Bunn, S. E. and P. M. Davies (2000), "Biological processes in running waters and their implications for the assessment of ecological integrity", *Hydrobiologia*, 422/423, pp. 61-70.
- CAN (2003), PGACRPSP [ftp://ftp.consejosdecuenca.org.mx/pub/downloads/docs_basicos/ejecutivos/8-RPSP.pdf].
- CONAGUA, REPDA (2005), *Usos consuntivos de agua superficial y subterránea* [http://www2.ine.gob.mx/emapas/download/lch_usos_consuntivos.pdf].
- CONAGUA (2008), *Estadísticas del agua en México* [www.conagua.gob.mx].
- CONAGUA (2011), *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*, SEMARNAT.
- CONANP (2009), *Manifestación de Impacto Regulatorio Proyecto de Decreto de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales Nayarit en los municipios de Acaponeta, Rosamorada, Santiago Ixcuintla, Tecuala y Tuxpan en el estado de Nayarit* [<http://www.cofemermir.gob.mx/uploadtests/15212.66.59.42.ProblematICA%20Marismas%20Nacionales.pdf>].
- CONANP (2010), [http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/programa_manejo.php].
- De la Lanza Espino, G. (2009), *Lo grandioso de los manglares, y lo que se está perdiendo*, Instituto de Biología, UNAM, México [<http://www.smf.mx/C-Global/webMangls.htm>].
- De la Lanza Espino, G. y ¿ Gómez Rojas (2010), "Marco ambiental, social y económico del Sistema Lagunar de Marismas Nacionales", Informe Final WWF-Instituto de Biología, UNAM.
- De la Lanza Espino, G. y J. L. García Calderón (1993), "Los sistemas hídricos costeros del noreste de México, un recurso amenazado", en Rivero, O (ed.), *Memorias de la Reunión Anual del Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA)*, 21-24 de octubre de 1992, UNAM, México.
- Escobar, J. (2002), *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*, Naciones Unidas, Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- FIDERCO y UAN (2011), *Análisis regional de la gestión del agua en la Región Centro Occidente, Parte II. Situación actual y perspectivas para el manejo del agua*, Programa de Desarrollo Región Centro Occidente, Fideicomiso para el Desarrollo de la Región Centro Occidente/ Universidad Autónoma de Nayarit, Guadalajara, pp. 104 a 244 [<http://www.centrooccidente.org.mx/downloads/08%20Análisis-Gestión-Agua-2-3.pdf>].
- Fischer, S. and 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, pp. 305-317.
- González Mora, I. D., G. de la Lanza Espino y R. Sánchez Navarro (2009), *Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco*, Word Wildlife Foundation, Fundación Río Arronte Gonzalo, pp. 13-19.
- IMTA (2003), Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), 8 CD, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos.
- NOM-011-CONAGUA (2000), Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- PGACRPSP (2006), Programa de Gestión del Agua en las Cuencas de los ríos Presidio al San Pedro [ftp://ftp.consejosdecuenca.org.mx/pub/downloads/CCPSP/1_PGACRPSP.pdf].
- Sánchez Navarro, R. y E. Barrios Ordóñez (2011), "Caudal ecológico: propuesta metodológica. Ejemplo de caso río San Pedro mezquital, Marismas Nacionales, Nayarit", *Ambiente, Biología, Sociedad, Manejo y Legislación de la Zona Costera Mexicana*, pp. 358-386.
- Schiemer, F. (2000), "Fish as indicators for the assessment of the ecological integrity of large rivers", *Hydrobiologia*, 422/423, pp. 271-278.
- UNISYS, Weather NOAA [www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears].
- WWF (2006), *Chihuahua freshwater-A global ecorregión*, World Wildlife Fund [www.panda.org/about_wwf/where_we_work/ecoregions/chihuahuan_freshwater.cfm].
- WWF (2009), *Propuesta de régimen de caudales ecológicos para el Río San Pedro en Marismas Nacionales*, World Wildlife Fund.
- WWF (2011), *Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos. Aproximaciones Hidrológicas*, México, Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., World Wildlife Fund.