

Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México

Recibido: 15 de enero de 2013. Aceptado en versión final: 28 de febrero de 2014.

Guadalupe de la Lanza Espino*
Sergio Alberto Salinas Rodríguez**
José Luis Carbajal Pérez*

Resumen. El cálculo del caudal fluvial necesario para mantener los servicios ambientales de los diferentes tipos de cuenca en los ríos de México, ha sido un elemento a cumplir en la Norma Mexicana, lo que permite una adecuada administración del recurso hídrico. Para dicho cálculo se han propuesto diferentes metodologías, una de las cuales por su sencillez es la hidrológica, requiriendo para ello una base de datos de escurrimientos que permitan determinar el volumen de agua necesario para las funciones de los ecosistemas. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue estimar dicho caudal en el río Piaxtla, Sinaloa. Para ello se compararon bases de datos de escurrimientos de 36 y nueve

años que mostraron diferencias fundamentalmente entre la frecuencia de las máximas avenidas y sus orígenes, lo que recomienda contar con base de datos mayores a veinte años; sin embargo, en el cálculo final del caudal ambiental los resultados fueron semejantes, es decir, reservar del volumen total del escurrimiento el 62.1% considerando un lapso de 36 años de estudio y 57.7% tomando en cuenta nueve años de información.

Palabras clave: Flujo ambiental, caudal río-Piaxtla, objetivo ambiental.

Environmental flow calculation for the maintenance of the water reserve of the Piaxtla River, Sinaloa, Mexico

Abstract. The calculation of river flows necessary to maintain the environmental services of the diverse river basins in Mexico has been an element to be considered in complying with the Mexican Norm and in allowing an adequate administration of water resources. Several methods have been proposed for this calculation, among which a very simple one is a hydrological method that requires a data base on

runoff to determine the volume of water that ecosystem functions need. Hydrological methodology proposed by the NMX cited above, provides guidelines for establishing a regime as a percentage of average annual runoff and it is assumed maintain biological attributes at certain levels of conservation. It also analyzes the regime of seasonal normal flow for wet hydrological conditions, socks, dry and very

* Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior Jardín Botánico, Ciudad Universitaria, 04360, Coyoacán, México D.F. E-mail: gdlle@unam.mx

** WWF México, Av. México 51, Col. Hipódromo, 06100, México, D.F. E-mail: ssalinas@wwfmex.org

Cómo citar:

Lanza E., G. de la, S. A. Salinas R. y J. L. Carbajal P. (2015), "Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 87, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 25-38, dx.doi.org/10.14350/riig.35269.

dry, and the system of avenues (considered as the sudden increase in the volume and speed of the current in a river due to runoff resulting from rain cyclical or extraordinary, it is also known as flooding), considering at least three categories of avenues (intra-annual, annual and interannual low magnitude of average size) with corresponding attributes of magnitude, duration, frequency, time of occurrence and rate exchange. For greater certainty calculation it will always be necessary to have records in the three levels of a basin. This level of analysis is to determine the final volume of ecological flow, considering the benchmark to achieve the previously defined environmental objective. For ecological calculation referred by the NMX, some fundamental aspects were considered, such as: ecology importance (which ranks among very high, high, medium and low based on the concepts of the rule itself); use pressures (determined as the ratio percentage of the volume allocated over the concession between the annual average availability basin or aquifer, determined as high $\geq 80\%$, $\geq 40\%$ high, medium and low $\geq 11\% \leq 10\%$); the environmental objective (ecological status to be achieved within the watershed to maintain the integrity of existing ecosystems or when they believe that they are degraded, contributing to the recovery or rehabilitation); and annual percentage rate recommended for environmental protection. Based on this, the purpose of this study was to quantify the river flow of the Piaxtla river,

in the state of Sinaloa. The river runoff data bases for 36 and nine years were compared, showed differences mainly between the frequency of maximum runoff and its origin, and indicated that it is advisable to use a data base of more than 20 years. However, results were similar in the final calculation of the environmental or ecological river flows; that is to say, total runoff volume was 62.1% considering 36 years and 57.7% for nine years of information. We conclude that the ecological importance of Piaxtla river was very high and the use of water pressure was low (considering that database runoff only included until 1999 and did not take into account population growth and activities). To determine the final volume reserved for the environment or ecological flow, could be estimated not only with a database of 36 years, but for nine years also confirming that those rivers that have databases of 10 years can the methodology used hydrological indicated by the NMX said. Particularly in this study it was determined that for parameters more detailed as the volume of the base rate of the annual volume, according to the frequency of occurrence, both very dry years, dry, average and wet, and influence of meteorological events that determine periods separate return, it is advisable to use minimum data bases as brand NMX 20 years.

Key words. Ambient flow calculation, river-Piaxtla, environmental objective.

INTRODUCCIÓN

Dado los servicios ambientales que prestan los ecosistemas acuáticos tales como ríos, lagos, lagunas y en general los humedales, sean interiores o costeros, se han visto sometidos a presiones por la repartición de la disponibilidad hídrica, misma que se ha enfocado en mayor grado a los servicios y actividades antropogénicos a costa de perder los servicios ambientales de los sistemas lóticos y lénticos que juegan un papel importante no solo ecológico sino económico, social y cultural (WWF, 2011a).

En las 314 grandes cuencas que se encuentran en el país, el problema existente entre abundancia de agua y población, en una dimensión geográfica, muestra una distribución geográfica desigual y un mal manejo dirigido fundamentalmente para los diversos usos humanos y sus actividades, resultado de la falta de regulación y vigilancia de su empleo, sin considerar como un usuario más al ecosistema.

Al 31 de diciembre del 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas, conforme a la norma NOM-011-CONAGUA-2000,

en tanto que para el 31 de diciembre de 2010 se habían añadido otras nueve cuencas.¹

Por ello la CONAGUA se dio a la tarea de elaborar la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012

que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, que se basa en mantener el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, así como permitir la protección de los ecosistemas riparios, ecosistemas acuáticos, terrestres y costeros, que garanticen un régimen de caudal ecológico en las corrientes o escurrimientos...

dicha norma fue generada con la participación de los sectores oficial, académico y ONGs.

La CONAGUA (2012) define al caudal ecológico como:

la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios

¹ (<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2011.pdf>).

ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales. Esto implica que además de proveer agua para los usos doméstico, público urbano, pecuario y agrícola, es posible mantener caudales provenientes tanto del escurrimiento, como de las descargas de los acuíferos para la conservación de los ecosistemas lóticos (ríos perennes, intermitentes y efímeros), lénticos (lagos, lagunas y humedales) y riparios con la aportación de los acuíferos al ecosistema, que sirven para conservar la biodiversidad y los servicios ambientales.

El manejo equitativo del agua, considerando en ello a la conservación de los ecosistemas, ya ha sido prevista internacionalmente, por lo que se han propuesto diferentes metodologías para la determinación del régimen de caudal ecológico. Retomando a la NMX-AA-159-SCFI-2012, ésta refiere que:

cualquier metodología será válida si reconoce que un ecosistema acuático modifica sus servicios ambientales como respuesta al aumento de los niveles de estrés. De esta manera y desde el punto de vista conceptual, cualquier procedimiento para la determinación de caudales ecológicos, partirá de reconocer las condiciones naturales del régimen hidrológico, su estado de alteración, las posibilidades de conservación o recuperación de los componentes del régimen hidrológico, para alcanzar o mantener un estado ecológico deseado u objetivo ambiental. La determinación del régimen de caudales ecológicos es un instrumento de la gestión del agua. Con base en el principio ecológico del régimen natural y el gradiente de condición biológica, que busca establecer un régimen para sostener a los ecosistemas, los usos del agua y las necesidades de almacenamiento a lo largo de un año.

La metodología “hidrológica” es la más simple y en ésta se determina el estudio de una serie de caudales históricos de cualquier cuerpo de agua léntico o lótico a estudiar. La metodología de Tennant o de Montana (1976) define el caudal ecológico como el porcentaje de un volumen de agua,

determinante para el desarrollo de los organismos acuáticos y el buen estado de su hábitat; con base en los parámetros ancho, profundidad y velocidad de la corriente, se registran grandes variaciones en un intervalo que va de 10% del caudal medio anual que es el mínimo para garantizar la sobrevivencia para ciertos organismos acuáticos; el 30% recomendable para un hábitat bueno en la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuática; el 60% para un hábitat de características excelentes, y el 100% del gasto medio anual como muy adecuado para el desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos. Este método es rápido y económico a pesar de ser solo una aproximación. Está también, por mencionar otro, el de simulación del hábitat que considera información biológica, calidad del agua y características hidráulicas de un río o cuerpo de agua; información que se le suministra al programa Physical Habitat Simulation System;² este método fue utilizado y comparado con el de Análisis Multivariados y el de Tennant por González y Banderas (2007) en el río Santiago, Nayarit.

Dentro de la NMX citada se menciona la metodología holística utilizada en sitios con una alta variabilidad en el régimen de caudales, donde se han construido grandes presas, transformando así las características de la cuenca: este es el Building Block Methodology (BBM), (King *et al.*, 2008) que requiere de registros históricos de caudales, variables hidráulicas y modelos que relacionan el caudal con requerimientos de algunos componentes del ecosistema, además de información económica y social.

En esta cuenca se utilizó el método holístico. En el río San Pedro, Nayarit (Sánchez y Barrios, 2011), en el río Acaponeta, Nayarit (De la Lanza *et al.*, 2012) por citar algunos estudios en la zona en los que hasta ahora se les ha calculado el caudal ecológico y que presentan aún una baja presión del uso del suelo. Debido a que muchos ríos de México se encuentran en diferentes condiciones de impacto o de mal manejo del agua, este trabajo tiene como objetivo utilizar la metodología hidrológica en el río Piaxtla, Sinaloa, que muestra actividades agrícolas y urbanas de diferente densidad en las márgenes de su

² (<http://www.fort.usgs.gov/products/Publications/15000/chapter1.html>).

cauce; asimismo, compara una base de datos de gastos de 36 años con la de nueve años, con la intención de poder usar bases de datos de menos años, ya que muchas cuencas del país no cuentan con un mínimo de veinte años, como lo marca la NMX.

ÁREA EN ESTUDIO

El río Piaxtla se encuentra entre las coordenadas $105^{\circ}27'$ y $106^{\circ}58'$ de longitud oeste y $23^{\circ}31'$ y $24^{\circ}26'$ de latitud norte (Gobierno del Estado de Sinaloa, 2006; Figura 1). Perteneció a la Región Hidrológica-Administrativa III del Pacífico Norte; esta región hidrológica descarga a la vertiente del Océano Pacífico a través de cinco ríos (Figura 1): Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla y Quelite, que descienden de los flancos de la Sierra Madre Occidental (CNA, 1999).

Las características topográficas del territorio son contrastantes y heterogéneas; la estructura orográfica más importante es la Sierra Madre Occidental, con elevaciones cercanas a los 3 340 msnm. Cuenta con una precipitación media anual de 810 mm y presenta una distribución regular, concentrándose en la zona central del territorio (CNA, 1997).

El río Piaxtla llamado también río Tayoltita, corresponde a la región hidrológica número 10, localizada en el noroeste del país; tiene como prin-

cipales afluentes los ríos San Dimas y San Jerónimo, cuenta con una longitud de 220 km, drena una cuenca de 11.473 km² y su parteaguas alcanza 450 km. Cruza los estados de Durango y Sinaloa en la zona N y NO; pasa por los poblados de Ixtapalino y Piaxtla, entre otros, hasta su desembocadura en el Golfo de California, en la llamada barra de Piaxtla (CONAGUA, 2010a).

El río Piaxtla está limitado al norte por la cuenca hidrológica del río San Lorenzo y parte del río Elota, al sur por las cuencas hidrológicas de los ríos Quelite y Presidio, al este por la región hidrológica número 36 Nazas-Aguanaval y al oeste por el Golfo de California. Tiene un escurrimiento superficial medio anual de 1 415 Mm³ (CNA, 1999; CONAGUA, 2008). En la Norma Oficial Mexicana (2007) se señala que el volumen de disponibilidad es de 1 403.22 Mm³ anuales, este volumen está referido desde la estación hidrométrica 10111 Piaxtla, que se encuentra entre $23^{\circ}56'00''$ N y $106^{\circ}25'30''$ W hasta su desembocadura en el Golfo de California. La principal demanda de agua en la región es para uso agrícola y se utiliza en los distritos de riego, los cuales se han desarrollado principalmente en la zona sur del estado. Existen diez distritos de riego, de los cuales seis se localizan en el estado de Sinaloa, que le corresponden a Piaxtla-Elota 22 800 ha (Distrito de riego 108).

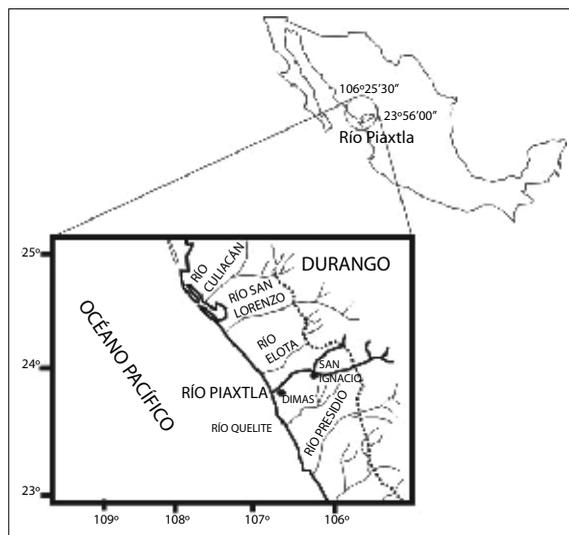


Figura 1. Localización del río Piaxtla, Sinaloa.

METODOLOGÍA

Con base en lo publicado en la Norma Mexicana (NMX 2012) y lo descrito en De la Lanza *et al.* (2012), se presenta a continuación la metodología empleada. Se definieron algunos aspectos fundamentales a considerar en esta evaluación, como son: presión por el uso del agua, importancia ecológica, objetivo ambiental y régimen de caudal ecológico recomendado para la protección ambiental. Estos elementos se obtuvieron de acuerdo con lo establecido en la NMX-AA-159-SCFI-2012 (Apéndice D, aplicación 2), tomando como base metodológica las Guías para la Determinación de Caudales Ecológicos (WWF, 2011a y b).

El nivel de la presión del uso del agua se obtuvo mediante la relación en porcentaje del volumen

asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual de la cuenca del río. Adicionalmente, fue considerada la presión de uso de acuerdo con la Identificación de las reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México que señala al río Piaxtla con una reserva potencial de agua de muy alta factibilidad, al contar con una disponibilidad de 1 403.2 Mm³ (CONAGUA, 2011).

El estado de conservación deseado se obtuvo del objetivo ambiental asignado para la cuenca (muy bueno), relacionando la importancia ecológica (muy alta) y la presión de uso (baja; CONAGUA, 2012).

Con la finalidad de conservar su régimen hidrológico natural, se deberá determinar un régimen y reservar un volumen anual de agua para uso ambiental o para la conservación ecológica conforme a la Ley de Aguas Nacionales.

Para determinar el caudal ecológico del río Piaxtla se empleó el método hidrológico 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; 2011a y b).

Para el cálculo del caudal ecológico se emplearon los registros de la estación hidrométrica de Ixpalino (la más cercana a la planicie costera), para las series de tiempo comprendidas de manera consecutiva: de 1953 a 1988 (36 años) y de 1991 a 1999 (nueve años), obtenidos de la base de datos de la CONAGUA (2010b).

Para calcular el régimen de caudales ordinarios estacionales de los distintos tipos de años (húmedos, medios, secos y muy secos) del registro hidrológico (36 y nueve 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 (CONAGUA, 2012; Sánchez y Barrios, 2011; WWF, 2011a y b), 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, en este caso y de acuerdo con el nivel de conservación requerido para el río Piaxtla que es muy alto, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.1 para años muy secos, secos, medios y húmedos, respectivamente.

El volumen anual de caudales ordinarios estacionales se definió a partir del volumen anual de los 36 y nueve años empleados multiplicando por sus correspondientes frecuencias de ocurrencia, mediante la siguiente expresión:

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

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 (H), medias (M), secas (S) y muy secas (MS).

Conforme a lo establecido por CONAGUA (2012) y descrito por Sánchez y Barrios (2011) y WWF (2011a y b), se consideró para el régimen de avenidas las siguientes categorías; intraanuales (categoría I = avenidas con periodo de retorno de un año), interanuales de baja magnitud (categoría II = avenidas con periodo de retorno de 1.5 años) e interanuales de media magnitud (categoría III = avenidas con periodo de retorno de 5 años), con sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio. La magnitud de las avenidas tipo o por categoría se identificó tomando los caudales máximos anuales de la serie de datos y realizando un ajuste con las siguientes distribuciones estadísticas: Gumbel, Pearson Tipo III y Log Normal, seguido del promedio de la magnitud de las avenidas para los periodos de retorno indicados, para la serie de datos considerados. Para caracterizar las avenidas se describió, a partir de su magnitud, su duración,

momento de ocurrencia y tasa de cambio correspondiente a cada tipo de avenida. Para cada año natural (de los 36 y nueve años considerados) se obtuvo el caudal máximo diario, a partir del cual se determinó la magnitud de las avenidas, asociados a los siguientes periodos de retorno:

La duración representativa de las avenidas para cada categoría se obtuvo al contabilizar el número de días en el que se encontró el 75% de ocurrencias, por encima del momento de éstas para cada categoría que se adquirió a partir de la contabilización del 90% de los eventos 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 (36 y nueve años). Sobre esta serie se calculó la tasa de cambio entre días consecutivos, mediante la siguiente ecuación:

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

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

La tasa de cambio representativa de dichos eventos, fue ajustada conforme a la caracterización estadística de los incrementos positivos por el percentil 90 y para los negativos el percentil 10.

Para ajustar 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; CONAGUA, 2012; Sánchez y Barrios, 2011; WWF, 2011a y b).

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;

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

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.

RESULTADOS

El caudal del río Piaxtla es perenne; sus escurrimientos promedio durante los periodos de registro históricos (1953-1989 y 1991-1999), fueron $> 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, en el 84% de los registros calculados en la etapa de 36 años y del 100% en el periodo de nueve años. Según CONAGUA (2009), en la actualidad se presentan pocas alteraciones, por lo que se considera como caudal natural, con un escurrimiento medio anual de $1\,415 \text{ Mm}^3/\text{año}$; este caudal se utiliza para el regadío de una gran área agrícola de 22 800 ha para diferentes cultivos, como frijol, cártamo, sorgo forrajero, sorgo escobero y alfalfa; en los frutales destaca el mango (Enciclopedia de los Municipios de México, Sinaloa: San Ignacio, 2005),³ que corresponde al 15.24% del caudal total anual del escurrimiento. En la Tabla 1 se resumen los diferentes atributos del río Piaxtla.

Con una base de datos de 36 años (1953 a 1989) del citado río, se pudo observar que eran frecuentes las avenidas superiores a los $600 \text{ m}^3/\text{seg}$, con avenidas extraordinarias en los años 1958, 1962, 1963, 1968, 1972, 1974, 1980, 1981, 1985 y 1986 que sobrepasaron los $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, incluso en algunos casos como en 1972 y 1985, avenidas que se presentaron repetidamente en estos años (Figura 2). En el periodo de nueve años se presentó, en enero de 1992, una avenida superior a los $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ y dos más que superaron los $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

El régimen de avenidas se registra en las principales crecidas en los meses de septiembre y octubre, incluso llegan hasta diciembre y enero. Otro rasgo importante es el hecho de que en septiembre de 1968 se presentó el mayor caudal con $4\,430.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 2).

³ (<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/sinaloa/mpios/25016a.htm>).

Tabla 1. Ponderación de los atributos del río Piaxtla

Atributos	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*	1 415 Mm ³
Volumen anual de extracción de agua sup.*	11.8 Mm ³
Volumen anual actual comprometido	3.4 Mm ³
Disponibilidad de la cuenca hidrológica**	1 403.2 Mm ³

* CONAGUA, 2009.

** CONAGUA, 2010a.

Tomando en consideración el Escurrimiento Medio Anual (EMA) obtenido a partir de los registros de los 36 y nueve años referidos como promedio, se obtuvo 47.93 y 75.94 m³/s, respectivamente. Asimismo, siguiendo la metodología de la NMX (CONAGUA, 2012) y Sánchez y Barrios (2011) así como WWF (2011a y b), se calculó el caudal ecológico (Q_{ecol}) a partir del percentil 60 reservado para

finés ambientales, en cuyo caso se determinaron 28.76 m³/s para 36 años y 45.56 m³/s para nueve años; en ambos parámetros y en los lapsos calculados existe una diferencia menor del 50% (Tabla 2).

En el periodo de 36 años se pudieron observar los caudales máximos por efecto del fenómeno de El Niño y los huracanes (UNISYS, 2012), también se observaron mínimos en la condición hidrológica muy seca con caudales < 0.5 m³/s. Para los nueve años en esta condición hidrológica, se encontró como valor mínimo 0.7 m³/s; escasa diferencia entre los dos periodos de estudio utilizados en este estudio. El patrón general de los caudales mantiene un modelo definido en su régimen, destaca la época de lluvias en donde se incrementa a partir del mes de junio hasta alcanzar su máximo en agosto y septiembre, para descender en los meses de octubre a diciembre y posteriormente decaer en forma drástica hasta lograr el escurrimiento mínimo anual de abril a junio (época de estiaje), (Figura 3A), en

Tabla 2. Promedio del Escurrimiento Medio Anual (%EMA) y del caudal ecológico (Q_{ecol}) en m³/s para los periodos analizados

Reserva ecológica de agua según un percentil del 60%		
Periodo	36 años	9 años
EMA	47.93	75.94
Q _{ecol} elegido	28.76	45.56

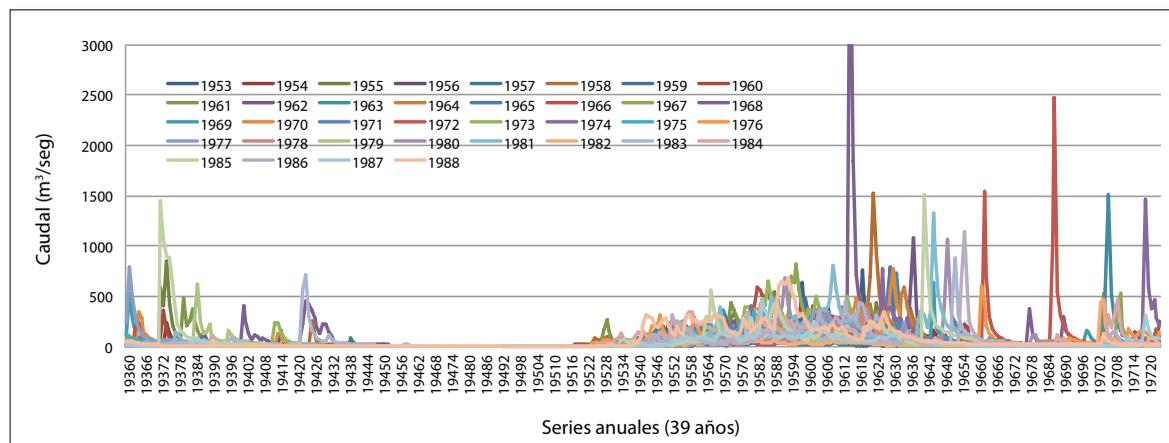


Figura 2. Escurrimiento diario durante el periodo de 1953 a 1989, río Piaxtla. Los colores representan cada uno de los años de la serie.

el periodo de nueve años la época de estiaje fue de febrero a mayo (Figura 3B).

El comportamiento del régimen hidrológico para los cuatro tipos de años y considerando los dos periodos elegidos, muestra en general una heterogeneidad; sin embargo, con base en la Tabla 3 se observa que en el periodo de nueve años (1991 a 1999) se incrementó el escurrimiento en un 30% aproximadamente en todos los meses, en comparación con el periodo de 36 años (1953 a 1989); esto fue resultado de que en la década de los noventa se presentó un fenómeno de El Niño de una duración de tres años (1991-1994 considerado de los más largos) y otro Niño de dos años de (1997-1998 de gran magnitud) que se caracterizaron por el incremento de lluvias invernales. En cambio, de 1953 a 1988, a pesar de que se presentaron cinco fenómenos de El Niño, no fueron de la misma magnitud y duración.

En los dos periodos analizados se determinó un patrón con ciertas diferencias en su régimen de caudales ordinarios para los cuatro tipos de años (muy secos, secos, medios y húmedos), definiéndose, como anteriormente se dijo, que en los años

muy secos tanto para la época de lluvias como de estiaje el caudal fue inferior (Figura 4A y B).

Una vez obtenido el régimen de caudales ordinarios estacionales para los diferentes tipos de años, así como su frecuencia de ocurrencia, se calculó el volumen para efecto del balance de disponibilidad, el cual fue para el periodo de 36 años de 753 Mm³/año para los muy secos, secos, medios y húmedos y para el caudal de nueve años fue de 1216 Mm³/año (Tabla 4), por la razón de la presencia de El Niño ya señalada.

Para obtener el régimen de avenidas de dicho río se identificaron los caudales máximos anuales de las series seleccionadas (1953-1988 y 1991-1999). Como se muestra en la Figura 5A y B, y de acuerdo con los dos periodos de tiempo, se observa que entre menor número de años, menor número registrado de máximas avenidas (36 *vs* 9).

Con objeto de identificar la magnitud de las avenidas asociadas a los periodos de retorno tanto para un año (categoría I), 1.5 (categoría II) como para cinco años (categoría III), se tomaron los caudales máximos anuales de la serie histórica de 36 años y se comprobaron los ajustes según diferentes

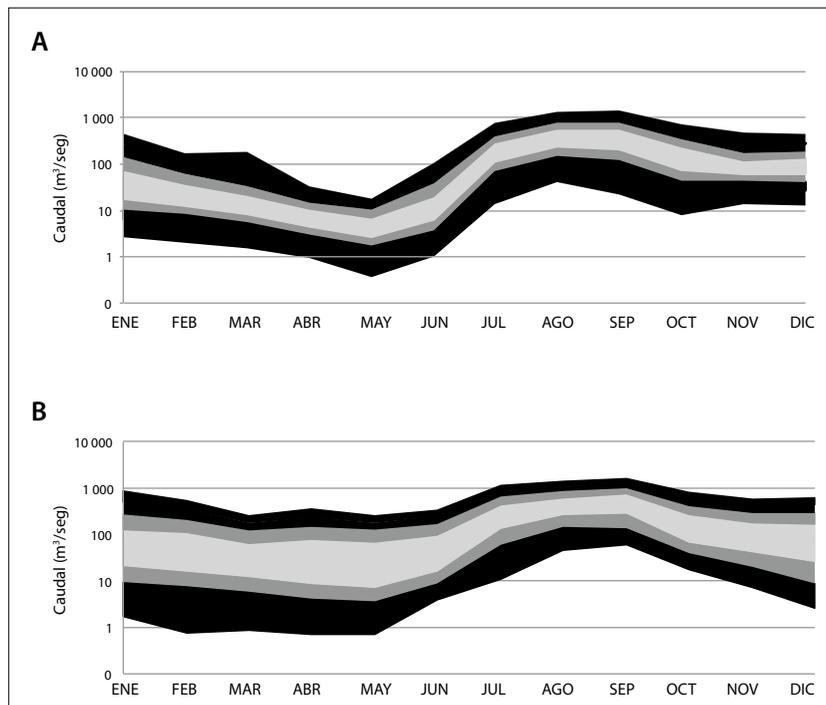


Figura 3. Patrones hidrológicos en régimen natural para el río Piactla (periodos: A 36 y B nueve años), los resultados están representados en escala logarítmica. Las diferentes tonalidades de gris muestran las probabilidades de ocurrencia de los caudales mensuales: negro intervalo entre el percentil 5-95; gris intervalo entre el percentil 10-90 y gris claro entre el percentil 25-75.

Tabla 3. Regímenes hidrológicos para las distintos tipos de años del río Piaxtla para los periodos de 36 y nueve años

Caudal ordinario estacional m ³ /seg													
Tipo de año	Peri. años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Muy seco	36	2.7	2.0	1.6	0.9	0.4	1.0	13.2	42.1	22.1	7.9	13.7	12.9
	9	1.7	0.8	0.9	0.7	0.7	3.9	10.8	45.4	58.8	17.7	7.4	2.6
Seco	36	4.1	3.4	2.2	1.1	0.7	1.5	31.8	61.1	60.8	19.5	15.0	14.6
	9	7.7	6.9	5.1	3.6	3.0	4.8	49.1	100.1	78.9	22.2	12.2	6.1
Medio	36	6.7	4.9	2.9	1.7	1.0	2.6	41.4	95.4	92.4	33.8	16.8	19.4
	9	11.8	8.6	6.2	4.3	3.7	8.1	80.0	118.5	158.8	31.6	24.6	17.4
Húmedo	36	37.7	14.7	7.3	3.7	2.4	7.6	92.9	171.8	191.5	85.7	29.9	39.7
	9	69.6	60.8	30.4	52.1	47.7	56.5	181.7	199.1	230.5	116.1	87.8	89.4

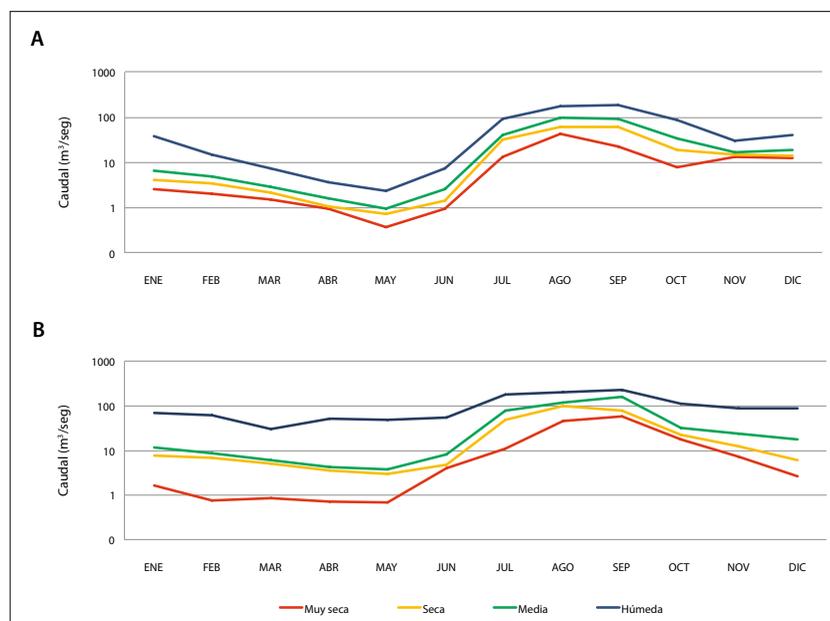


Figura 4. Régimen de caudales ordinarios estacionales para los periodos de A 36 y B nueve años.

distribuciones estadísticas (Gumbel, Log Pearson Tipo III y Log Normal). Como se observa en la Figura 6, los valores de este ajuste muestran a las crecidas anuales de retorno en la categoría I con 180 m³/s, en la categoría II con 525 m³/s y las crecidas de periodos de retorno de cinco años (categoría III) con 1 300 m³/s. Lo anterior señala que cualquier herramienta estadística puede ser usada para identificar las distintas avenidas en el río Piaxtla.

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de los caudales diarios del río Piaxtla con las tres categorías

de crecidas identificadas, agrupándose las crecidas de las categorías II y III en el mes de septiembre fundamentalmente y, por el contrario, las crecidas de la categoría I se distribuyen principalmente desde julio hasta octubre, con alguna presencia en enero y febrero; sin embargo, en enero de 1985 de forma excepcional se presentó la categoría III.

Después de haber calculado el régimen de avenidas se definió el volumen anual de cada categoría con base en sus respectivas frecuencias de ocurrencia para un periodo hipotético de diez años; esto permitió determinar las características básicas de las

Tabla 4. Volumen anual (Mm³/año) conforme a la frecuencia de ocurrencia dada para un objetivo ambiental clase “A” del río Piaxtla

Tipo de año	Muy secos		Secos		Medios		Húmedos	
Percentil	P0		P10		P25		P75	
Frecuencia de ocurrencia (fC_{oe})	0.2		0.3		0.4		0.1	
Unidad	Mm ³ /año		Mm ³ /año		Mm ³ /año		Mm ³ /año	
Periodos en años	36	9	36	9	36	9	36	9
VC _{oe} *	319	399	570	792	843	1443	1810	3219
% Esc. medio anual	21.1	16.7	37.7	33.1	55.8	60.2	119.8	134.4
VtC _{oe} **	753 (36)		1216 (9)		% del escurrimiento medio anual		50(36)	51(9)

* Volumen del régimen de caudal base, para cada condición.

** Volumen para efecto del balance de disponibilidad.

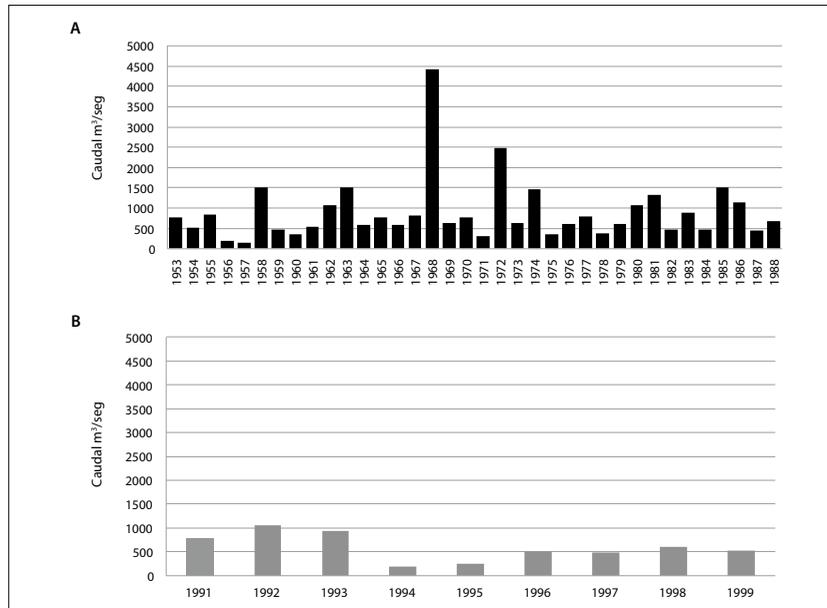


Figura 5. Caudal máxim anual de las series de 1953 a 1989 (A) y de 1990 a 1999 (B).

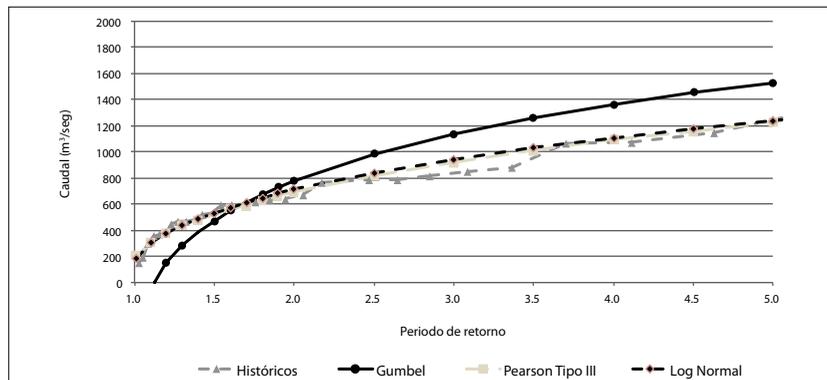


Figura 6. Distribución estadística para identificar la magnitud de las avenidas a distintos periodos de retorno del río Piaxtla.

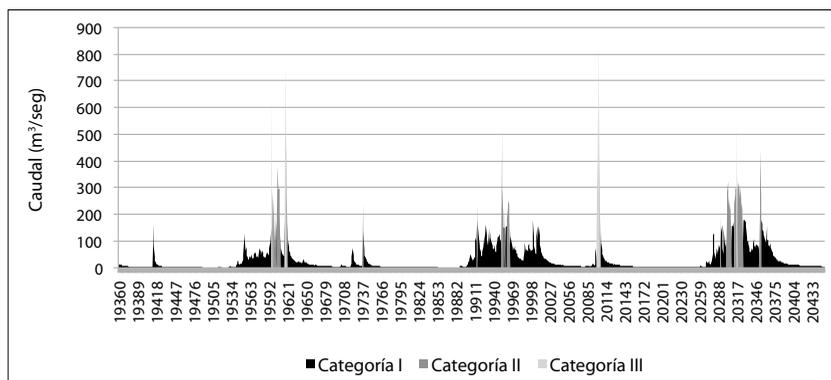


Figura 7. Distribución de las categorías de las crecidas del río Piaxtla para el periodo de 1953 a 1989.

crecidas (magnitud, frecuencia, duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio). En los resultados de dichos atributos para este régimen hidrológico con fines de conservación (muy alto) tendrían que ocurrir dos crecidas categoría III mayores a 1 300 m³/s, seis crecidas categoría II con una intensidad mayor a los 525 m³/s pero inferiores a los 1 300 m³/s y diez crecidas categoría I superiores a los 180 m³/s sin llegar a los 525 m³/s; el volumen total anual para el régimen de avenidas se calculó de 186 Mm³ (Tabla 5).

Como estrategia de conservación de los procesos del ecosistema del río Piaxtla, se calculó el volumen final de reserva (V_{fr}) o caudal ecológico para el balance de la disponibilidad de la cuenca, que se obtuvo a partir del volumen anual para el régimen de avenidas (V_{tra}) más el volumen de disponibilidad anual (V_{tCoe}), calculándose un volumen final de 939 Mm³/año para el periodo de 36 años y de 1 382 Mm³/año para los nueve años (Tabla 6). Esta propuesta de caudal ecológico está conformada por un régimen de caudales base y uno de crecidas, con la finalidad de respetar el patrón natural de escurrimiento. De lo anterior resulta un 62.1 y 57.7%, respectivamente, de Escurrimiento Medio Anual (EMA).

DISCUSIÓN

Con base en los resultados anteriores la presión de uso del río Piaxtla es ≤10% considerada como baja; que el escurrimiento de 1 415 Mm³ referido por la CNA (1996) es semejante a la disponibilidad

Tabla 5. Régimen de avenidas y volumen anual de acuerdo con el objetivo ambiental clase “A” para el río Piaxtla, periodos de 36 y nueve años

Periodos analizados		36 años	9 años
Atributo del régimen hidrológico (m ³ /s)	Categoría I	180	150
	Categoría II	525	430
	Categoría III	1300	870
Tasa de cambio (%)	Ascenso	81	66
	Descenso	41	28
*Vtra al año Mm ³		186	150

* Volumen total del régimen de avenidas.

Tabla 6. Volumen final de reserva anual (V_{fr}) para los periodos de 36 y nueve años del río Piaxtla

Periodos	Unidades	36 años	Nueve años
Volumen para efecto del balance de disponibilidad (V _{tCoe})	Mm ³ /año	753	1216
Volumen total del régimen de avenidas (V _{tra})	Mm ³ /año	186	165
Volumen final de reserva V _{fr}	Mm ³ /año	939	1382
EMA	%	62.1	57.7

calculada que fue de 1 403 Mm³. En el caso del Piaxtla, dicha presión es baja, a pesar de que se haya incrementado un 37% la superficie agrícola en un periodo de 30 años aproximadamente, y que

se encuentra en condiciones satisfactorias. Además se define que el estado de conservación, obtenido a partir del objetivo ambiental, y la importancia ecológica es muy alta al igual que los ríos San Pedro Mezquital (Sánchez y Barrios, 2011) y el río Acaponeta (De la Lanza *et al.*, 2012) ambos en Marismas Nacionales, Nayarit, los cuales tienen una superficie agrícola semejante.

Tomando en cuenta el régimen de caudales ordinarios el periodo lluvioso se determinó entre julio y octubre, y el seco entre abril a junio, con una diferencia entre ambos superior al 80% en la precipitación para los periodos de 36 y nueve años. En consecuencia, los patrones estacionales de los caudales base y su régimen de caudales tanto del río Piaxtla como San Pedro y Acaponeta, siguen un patrón semejante; a pesar de las diferentes distancias entre los tres sistemas fluviales, se encuentran en el mismo tipo de clima y precipitación. Es necesario señalar que ninguno de estos ríos se seca de forma natural, aunque con caudales menores de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para Piaxtla y superiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para los otros dos ríos.

En el río Piaxtla se determinaron las avenidas máximas puntuales en la época lluviosa ($> 1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$) que pueden ser explicadas como resultado del periodo de eventos meteorológicos tales como huracanes o tormentas tropicales y fundamentalmente eventos El Niño en época invernal (Magaña, 2004), que incidieron en la cuenca. Estas máximas avenidas tienen un significado puntual a nivel interanual ambiental y no se perciben dentro del procedimiento metodológico de la NMX al efectuar el cálculo del caudal ecológico. Destaca el registro de 1968 que corresponde a $4\,430 \text{ m}^3/\text{s}$ y pertenece al máximo histórico de la serie con un probable periodo de retorno de 36 años.

El comportamiento de los caudales máximos para un periodo de 36 años es semejante entre los ríos Piaxtla y Acaponeta (Figura 8) pero no de la misma magnitud existiendo entre ellos una distancia de 280 km, lo que denota una diferencia entre la magnitud de influencia, incidencia y trayectoria de eventos meteorológicos entre los impactos de El Niño, el estado ecológico de las cuencas en términos de paisaje, alteración debido al cambio de uso del suelo, entre otros factores ambientales.

El problema de calcular el EMA y el Caudal Ecológico (Q_{ecol}) en los diferentes ríos de México, ha sido el de no contar con una base de datos mínima de caudales de veinte años como lo marca la NMX; sin embargo, De la Lanza *et al.* (2012) propusieron que podrían ser de diez años como mínimo con resultados aproximadamente semejantes con los de veinte años. En el caso del Piaxtla se compararon los resultados de EMA's y Q_{ecol} para los 36 y nueve años, obteniendo una diferencia mayor al 50% cuando se toma un menor número de años (nueve); esto puede ser resultado de lo que se señaló anteriormente; es decir, el número incidente de los eventos de El Niño su duración y magnitud, en consecuencia sus impactos, el estado ecológico de las cuencas en términos de paisaje, alteración debido al cambio de uso del suelo, entre otros factores ambientales, además de la ausencia y calidad de los registros entre las bases de datos (1953 a 1989 y 1991 a 1999); esta desigualdad se puede observar en el régimen de caudales ordinarios como se mostró en la Figura 4, aunque siga la misma delimitación entre las épocas de lluvias (junio a octubre) y secas (febrero a mayo). Dichas diferencias entre los dos lapsos de años estudiados se ven reflejadas también en el balance de disponibilidad siendo un volumen inferior en aproximadamente 38% en el caso de

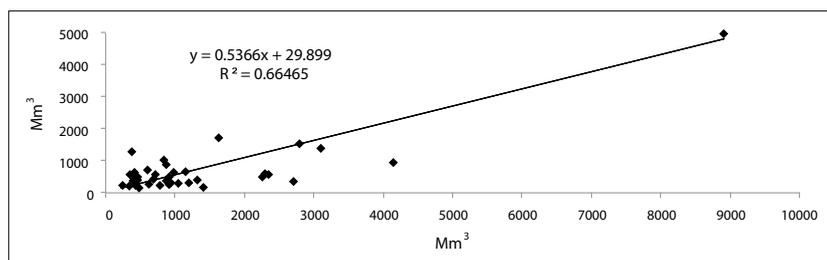


Figura 8. Correlación entre los caudales máximos diarios de las series de los ríos Acaponeta (eje X) y Piaxtla (eje Y).

los 36 años; sin embargo, en el cálculo final del volumen del régimen de avenidas la diferencia entre ambos periodos fue del 19%, más aún la diferencia porcentual en el cálculo del volumen para efecto del balance en el porcentaje del escurrimiento medio anual, la diferencia fue solamente de 2%, pero para el caudal ecológico en ambos periodos la diferencia fue de 4.4% (62.1% para 36 años y 57.7% para nueve años que deben ser reservados en términos de conservación ecológica). Cuando se cuenta con una base de datos menor a diez años como la aquí analizada, es menor el número de eventos meteorológicos determinados de cualquier tipo, en comparación con los registrados en más de 36 años donde se reconocieron diez eventos El Niño como los de 1958, 1962, 1963, 1968, 1972, 1974, 1980, 1981, 1985 y 1986, aunque de menor duración y magnitud como los registrados en el del periodo de nueve años, en donde solo se presentaron dos, lo mismo sucede con los huracanes o tormentas tropicales; aunque para el volumen final de reserva (EMA) no interfieran.

En cuanto a los periodos de retorno de las avenidas, solamente se pudieron calcular en el lapso de 36 años en donde se determinó un periodo de retorno de cinco años (categoria III) con máximos de 1 300 m³/s, en cuyo caso por la importancia que reviste las condiciones de máximas inundaciones con un significado ecológico se recomienda se empleen periodos mayores de veinte años como lo marca la NMX.

Se concluye que la importancia ecológica del río Piaxtla era muy alta y la presión de uso del agua era baja (tomando en cuenta que la base de datos de escurrimientos solo incluyó hasta 1999 y no tomó en cuenta el crecimiento de la población y sus actividades). Para la determinación del volumen final reservado para el ambiente o caudal ecológico, pudo estimarse no solo con una base de datos de 36 años sino para nueve años también, lo que confirma que en aquellos ríos que tengan bases de datos de diez años puede utilizarse la metodología hidrológica señalada por la citada NMX. Particularmente, en este estudio se determinó que para parámetros más detallados como el volumen del caudal base del volumen anual, conforme a la frecuencia de ocurrencia, tanto para años muy secos, secos, medios

y húmedos, e influencia de eventos meteorológicos que determinan periodos de retorno distintos, es recomendable emplear bases de datos mínimos como lo marca la NMX de 20 años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Técnico Salvador Hernández Pulido por su apoyo en las figuras y correcciones tipográficas.

REFERENCIAS

- CNA (1996), *Consejo de Cuenca de los Ríos Mocorito al Quelite*, Subdirección General de Programación de la CNA [ftp://ftp.consejosdecuenca.org.mx/pub/downloads/docs_basicos/ejecutivos/7-RMQ.pdf; consultado 12 septiembre 2012].
- CNA (1997), "Consejo de Cuenca de los ríos Mocorito al Quelite", en *Entorno Regional del Consejo de Cuenca* [ftp://ftp.consejosdecuenca.org.mx/pub/downloads/docs_basicos/ejecutivos/7-RMQ.pdf].
- CNA (1999), *Región III Pacífico Norte*, Gerencia Regional Pacífico Norte, [http://siga.cna.gob.mx/siga/regionales/pacifico_norte/Sintesis.htm; consultado el 16 de agosto 2012].
- CONAGUA (2008), *Programa Nacional Hidráulico 2007–2012*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH_05-08.pdf].
- CONAGUA (2009), *Cuencas Hidrológicas, Subdirección General Técnica* [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/.../TM; consulta 12 de septiembre 2012].
- CONAGUA (2010a), *Disponibilidad de las Cuencas Hidrológicas*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México [<http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3yn2=63yn3=99>; consultado 31 octubre 2012].
- CONAGUA (2010b), *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*, Index of /webpatzcuaro/bandas/archivos/fichas-estaciones; [<http://atoyatl.imta.mx/webpatzcuaro/bandas/archivos/fichas-estaciones/>; consultado el 12 septiembre 2012].
- CONAGUA (2011), *Identificación de Reservas Potenciales de Agua para el Medio Ambiente en México*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México [<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGT-3-11Media.pdf>].

- CONAGUA (2012), Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI “Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas” [<http://200.77.231.100/work/normas/nmx/2010/nmx-aa-159-scfi-2012.pdf>; consultado 26 de septiembre 2012].
- De la Lanza Espino, G., J. L. Carbajal Pérez, S. A. Salinas Rodríguez y J. E. Barrios Ordóñez (2012), “Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 78, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 62-74.
- Enciclopedia de los Municipios de México, Sinaloa (2005), *San Ignacio*, Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Sinaloa [<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/sinaloa/mpios/25016a.htm>; consultado el 29 agosto 2012].
- Gobierno del Estado de Sinaloa (2006), *Programa de Gran Visión de Desarrollo Litoral PRODELI*, Secretaría de Desarrollo Económico [<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/PNDP2008/doc/pred/psin.pdf>; consultado 28 de octubre 2012].
- González Mora, I. D., G. de la Lanza Espino y R. Sánchez Navarro (2009), *Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco*, World Wildlife Foundation, Fundación Río Arronte Gonzalo, pp. 13-19.
- González Villela, R. y A. Banderas Tarabay (2007), *Estudio comparativo de tres metodologías para el manejo y cálculo de caudales ambientales en el río Santiago, Nayarit*, Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Universidad Autónoma de Querétaro, 19-23 de septiembre [www.ine.gob/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_03/27_rebeca_gonzalez.pdf].
- King, J. M., R. E. Tharme and M. S. de Villiers (2008), *Environmental Flow Assessments For Rivers: Manual For The Building Block Methodology*, WRC Report No TT 354/08, Republic of South Africa.
- Magaña, R. V. (2004), *Los impactos de El Niño en México*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
- NOM (2007), “Acuerdo en el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales de las cuencas hidrológicas río Piaxtla 1 y río Piaxtla 2, Norma Oficial Mexicana, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, tomo DC, 20, México [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/RP_DOF_29-11-2007.pdf; consultado 28 de octubre 2012].
- Sánchez Navarro, R. y E. Barrios Ordóñez (2011), “Caudal ecológico: propuesta metodológica. Ejemplo de caso río San Pedro mezquital, Marismas Nacionales, Nayarit”, en De la Lanza Espino, G. y S. Hernández Pulido (comps.), *Ambiente, Biología, Sociedad, Manejo y Legislación de la Zona Costera Mexicana*, pp 437-469.
- Tennant, D. L. (1976), *Instream flow regimenes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources*, US Fish and Wild Life Service,
- UNISYS (2012), “National Weather Service”, NOAA, Montana, USA [www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears; consultado 26 de septiembre 2012].
- WWF (2006), *Chihuahua freshwater. A global ecoregion* [www.panda.org/about_wwf/where_we_work/ecoregions/chihuahua_freshwater.cfm; consultado 26 de noviembre 2012].
- WWF (2011a), *Guía para la determinación de caudal ecológico*. Sistematización de experiencias de la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., México.
- WWF (2011b), *Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos*. Aproximaciones Hidrológicas. Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., México.