



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO HIDROLÓGICO PARA MANTENER LA
FUNCIONALIDAD DE LOS PRINCIPALES RÍOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA
RÍO VERDE ATOYAC, EN EL ESTADO DE OAXACA.**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:
MARÍA ALEJANDRA ZORRILLA DOMÍNGUEZ

TUTOR PRINCIPAL

DRA. GUADALUPE DE LA LANZA ESPINO
INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTORAL

DR. ALFONSO LUGO VÁSQUEZ
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

DRA. MARISA MAZARI HIRIART
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM

DRA. RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

MÉXICO, D. F. MARZO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Nacional Autónoma de México



**ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO HIDROLÓGICO PARA MANTENER LA
FUNCIONALIDAD DE LOS PRINCIPALES RÍOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA
RÍO VERDE ATOYAC, EN EL ESTADO DE OAXACA.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS
(BIOLOGÍA MARINA)**

P R E S E N T A:

MARÍA ALEJANDRA ZORRILLA DOMÍNGUEZ

DIRECTOR DE TESIS

DRA. GUADALUPE DE LA LANZA ESPINO

COMITÉ TUTORAL

**DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ
DR. ALFONSO LUGO VÁSQUEZ
DRA. MARISA MAZARI HIRIART
DRA. RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA**

MÉXICO, D. F. MARZO 2016

Agradecimientos

Con gran estima a la Dra. Lupita de la Lanza, mi directora de tesis, muchas gracias por su paciencia y disposición al dirigirme en este proceso de estudio y de vida.

A los Dres. Ruth, Marisa, Javier y Alfonso por sus oportunos comentarios, su gran empatía y apoyo.

Al Geog. Anuar Martínez Pacheco por el soporte técnico que me proporcionó.

Al Posgrado por aceptarme en su programa así como a CONACYT por haberme otorgado una beca.

Al personal del posgrado, Diana, Lupita, Gabriela y Chantal por su interés, disponibilidad y amabilidad para ayudarme desde que inicié la maestría, gracias Bellas.

De manera muy especial y afectiva al Biol. Ignacio D. González Mora por compartirme sus conocimientos, su experiencia pero sobre todo su valiosa amistad.

A Meli y Alejandro, por su eterno apoyo y amor expresado en muchas formas, sin ustedes no habría sido posible esta experiencia, les dedico este trabajo con todo mi ser, los amo padres.

A mis grandiosos amigos Tere y Luis por su particular entusiasmo para motivarme en este camino.

A Ángel por su incondicional compañía y por todos los momentos de paz que me ha brindado.

Gracias a todos los seres que de una u otra forma hicieron posible que lograra esta meta.

Contenido

1 INTRODUCCIÓN	3
2 JUSTIFICACIÓN	10
3 OBJETIVOS	13
GENERAL	13
ESPECÍFICOS	13
4 ÁREA DE ESTUDIO	14
4.1 CUENCAS HIDROLÓGICAS	15
4.1.1 Río Atoyac-Salado	15
4.1.2 Río Atoyac-Tlapacoyan	15
4.1.3 Río Sordo-Yolotepec	16
4.1.4 Río Atoyac-Paso de la Reina	16
4.1.5 Río Verde	16
4.2 ZONAS PRIORITARIAS PARA LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD	16
4.2.1 Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) de México	17
4.2.2 Regiones Marinas Prioritarias (RMP) de México	18
4.2.3 Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP) de México	18
4.2.4 Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (AICA)	19
4.2.5 Áreas Naturales Protegidas (ANP) y sitios prioritarios	20
4.3 CLIMA	21
4.4 GEOLOGÍA	22
4.5 PRECIPITACIÓN	24
4.6 HIDROLOGÍA	25
4.7 ÁREAS FUNCIONALES	26
4.8 VEGETACIÓN	28
4.9 FAUNA	28
5 METODOLOGÍA	28
5.1 PRESIÓN DE USO	30
5.2 IMPORTANCIA ECOLÓGICA	31
5.3 OBJETIVO AMBIENTAL	31
5.4 ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL	32
5.5 CAUDAL MEDIO MENSUAL	32
5.6 CONDICIONES HIDROLÓGICAS	32
5.7 CAUDAL BASE	33
5.8 ESCURRIMIENTO MEDIO MENSUAL	33
5.9 NATURALEZA DEL RÍO	33
5.10 ANÁLISIS DE ALTERACIÓN DE LA VARIABILIDAD HIDROLÓGICA	33
5.11 RÉGIMEN DE AVENIDAS	34
a) Magnitud-Frecuencia	34
b) Duración-Momento	35
c) Tasa de cambio	35
5.12 FRECUENCIA DE OCURRENCIA	36

5.13 CAUDAL ECOLÓGICO.....	36
6 RESULTADOS.....	38
6.1 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	38
6.2 CAMBIO DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	46
6.3 ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL.....	51
6.4 CAUDAL MEDIO MENSUAL.....	52
6.5 CONDICIONES HIDROLÓGICAS.....	54
6.6 CAUDAL BASE, NATURALEZA DEL RÍO Y ALTERACIÓN HIDROLÓGICA.....	58
6.7 AVENIDAS.....	62
6.8 CAUDAL ECOLÓGICO POR CUENCA HIDROLÓGICA.....	64
7 DISCUSIÓN.....	67
8 CONCLUSIÓN.....	72
9 BIBLIOGRAFÍA.....	75

Resumen

En el presente trabajo se examina el régimen natural de caudales de los ríos principales de las cuencas hidrológicas: Atoyac-Salado, Atoyac-Tlapacoyan, Sordo-Yolotepec, Paso de la Reina y Verde, en la cuenca hidrográfica del Río Verde Atoyac (CHRVA), en el estado de Oaxaca.

En función del escurrimiento superficial en cada cuenca, se calcularon los componentes de variabilidad hidrológica necesarios para conservar la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos, de acuerdo al régimen natural de caudales.

Para estimar el presupuesto hidrológico, es decir el caudal ecológico para conservar la funcionalidad e integridad de los ríos principales de las cuencas mencionadas, se aplicó la aproximación propuesta por la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte (Barrios-Ordoñez *et al.*, 2011; de la Lanza-Espino *et al.*, 2012, 2015; DOF, 2012b)

Se analizaron las series históricas de los caudales diarios de los ríos mencionados con la información hidrométrica del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS), de períodos entre 20 y 30 años, con un total de 38,727 datos. Esta información ha sido generada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en las estaciones hidrométricas (EH) bajo su circunscripción y es sistematizada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Se realizó un análisis de los componentes de variabilidad hidrológica que conforman el régimen natural de caudales para determinar: el valor de los escurrimientos en los meses del año así como en condiciones hidrológicas muy secas, secas, medias y húmedas; la naturaleza de la corriente; el caudal base; la alteración hidrológica y el régimen de avenidas. Para el caso de las avenidas, se

precisan cinco componentes de los ciclos anuales e interanuales: magnitud, frecuencia, momento de ocurrencia, duración y tasa de cambio.

Se determinó la importancia ecológica en cada una de las cuencas que conforman la CHRVA. En Atoyac-Paso de la Reina fue media, en el resto de las cuencas fue alta. La presión de uso en Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan fue media, en el resto de las cuencas fue baja. El estado de conservación de Sordo-Yolotepec y Verde fue muy bueno; en las tres cuencas restantes fue bueno. El análisis del régimen hidrológico natural (RHN) mostró alteración hidrológica solo en Atoyac-Tlapacoyan.

Se visualizó el efecto de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas terrestres en función de los cambios de uso de suelo registrados en la CHRVA durante las décadas de los 70 a los 90.

Posteriormente se determinó el presupuesto hidrológico en cada cuenca hidrológica, que en términos de la razón porcentual entre caudal ecológico y el escurrimiento anual promedio fue: 22.6% para Atoyac-Salado, 13.3% para Atoyac-Tlapacoyan, 76% para Sordo-Yolotepec, 56.2% para Atoyac-Paso de la Reina y 64.8% para Verde.

Se realizó una discusión considerando el estado de los servicios ecosistémicos, cambio uso de suelo así como la alteración hidrológica con el fin de tener una visión integrada de cuencas.

Los presupuestos hidrológicos del presente trabajo pueden considerarse, en la planeación futura de la administración del agua, como límites de uso que promueven la conservación de los ecosistemas acuáticos y de sus servicios ecosistémicos, específicamente la provisión sustentable de agua para las poblaciones.

1 Introducción

Los ríos constituyen ecosistemas complejos que actúan como vías de circulación de agua, sedimentos, organismos y nutrientes. De esta manera establecen una conectividad entre los diversos ambientes que conforman una cuenca hidrográfica. Influyen en los procesos químicos, físicos, de transporte y erosión que ocurren a través de su cauce, proporcionando soporte a innumerables formas de vida de flora y fauna (Garrido *et al.*, 2010).

Las formas de vida, y los ambientes a los que se encuentran asociadas, están adaptadas en función de las características del caudal que circula en un río. El caudal presenta variaciones que se manifiestan en forma de avenidas o sequías, con determinada regularidad y en distintas escalas de tiempo, que pueden ir desde unas horas, hasta estaciones y años (Poff *et al.*, 1997).

Estas variaciones son vitales dentro de la dinámica de los ecosistemas de las cuencas ya que cumplen con funciones ecológicas, que permiten su mantenimiento y desarrollo (Richter *et al.*, 1996; Postel y Richter, 2003; Jiménez *et al.*, 2005).

El comportamiento dinámico de estas variaciones es llamado régimen natural de caudales (Poff *et al.*, 1997). Es el resultado de la integración de los factores, procesos y sinergias de una cuenca, como el clima, topografía, geología, suelos, vegetación, tamaño y forma de la cuenca, tipología de la red de drenaje, usos del suelo, entre otros (Baker *et al.*, 2004). Proporciona sostén a la biodiversidad e integridad de los ecosistemas acuáticos, provee su estructura modelando sus condiciones ambientales y posibilitando la diversidad de hábitats y gran cantidad de interacciones (Poff *et al.*, 1997; Strange *et al.*, 1999; Arthington, 2002; Bunn y Arthington, 2002; Naiman *et al.*, 2002; Nilsson y Svedmark, 2002).

El régimen natural de caudales puede entenderse a través de dos principios considerados clave y de aplicación directa en el estudio de las necesidades hídricas de los ecosistemas acuáticos (Barrios *et. al*, 2011):

- El “Paradigma del Río Natural” (Poff *et al.*, 1997), que se refiere a que los distintos atributos del régimen de caudales del río (magnitud, frecuencia, duración, momento y tasa de cambio) deben mantenerse lo más cercano a su estado y variabilidad naturales, en un equilibrio de carácter dinámico.
- El “Gradiente de la Condición Biológica” (Davies y Jackson, 2006), que establece una relación inversamente proporcional entre los factores de estrés (como la contaminación y cambio en los flujos de agua) y la condición biológica de un sistema acuático; es decir, a menor estrés, mejor condición de los atributos biológicos y viceversa.

La relación que existe entre estos dos principios influye en las condiciones y procesos que ocurren en los ecosistemas acuáticos, así como en las especies que los habitan, lo cual sustenta su integridad ecológica. De acuerdo con Mackey (2005) ésta se entiende como el funcionamiento permanente, saludable o apropiado de los ecosistemas. Karr (1991) asocia la integridad con un sistema biofísico en el que prevalece una composición de especies y una organización funcional que existió en otro momento en el área evaluada. Esta aproximación refiere una intervención antrópica mínima o nula en los ecosistemas, por lo tanto, la integridad ecológica en buen estado de conservación se relaciona con estados originales o prístinos de los ecosistemas (Restrepo y Gómez, 2008).

La integridad ecológica de una cuenca sufre cambios provocados en su mayoría por actividades antrópicas, ya que los estados originales o prístinos de los ecosistemas se modifican en función de las necesidades generadas por el crecimiento poblacional en zonas urbanas y rurales. Estos cambios en el uso del suelo y vegetación generan procesos de deforestación o degradación forestal,

los cuales se asocian a impactos ecológicos importantes en diferentes escalas. A nivel local inducen la pérdida y degradación de suelos, cambios en el microclima y pérdida en la diversidad de especies; a nivel regional afectan el funcionamiento de cuencas hidrográficas y de asentamientos humanos y a nivel global, contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero que dan por resultado el problema del cambio climático global (Bocco *et al.*, 2001). Por otro lado los cambios en las coberturas vegetales tienen un papel importante en la variación del tirante de la lámina de escurrimiento superficial, lo que provoca la disminución de zonas de infiltración que afectan los sitios de recarga del acuífero (Villarreal, 2011).

Del grado de conservación de la integridad ecológica dependen la disponibilidad y calidad de los servicios ecosistémicos, definidos por la Evaluación de Ecosistemas del Milenio como los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas (EM, 2003), razón por la que es importante concebirlos como indispensables para el bienestar de los seres humano (Almeida *et al.*, 2007).

Los servicios ecosistémicos se clasifican en servicios de provisión, de regulación, de soporte y culturales. Los servicios de provisión son los productos que las personas obtienen de los ecosistemas, como los alimentos, combustibles, fibras, agua y recursos genéticos. Los servicios de regulación son los beneficios que las personas obtienen de los procesos de los ecosistemas, entre los que se incluye el mantenimiento de la calidad del aire, amortiguamiento del clima, control de la erosión, control de enfermedades humanas y purificación del agua. Los servicios de soporte son los procesos necesarios para la producción de todos los otros servicios de los ecosistemas, como la formación de suelos. Los servicios culturales son los beneficios intangibles que las personas obtienen de los ecosistemas mediante el enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión, recreación y experiencias estéticas (EM, 2003).

Los servicios ecosistémicos proporcionados por los ríos son los de mayor relevancia, ya que se consideran como base para el resto de los servicios del sistema (Sánchez *et al.*, 2012). Los de provisión son la recarga anual de agua en el mismo río o en los acuíferos, el arrastre de sedimentos y el transporte de nutrientes que asegura la productividad pesquera en las zonas costeras; los de regulación son la mejora de la calidad del agua a través de la asimilación y dilución de contaminantes, el amortiguamiento de eventos extremos de tormentas y sequías; entre los de soporte se tiene el transporte de sedimentos que forma cauces, meandros y playas, lo que permite la formación de hábitats y favorece la biodiversidad; y los culturales que proporcionan oportunidades de recreación, educación y turismo (Alianza WWF-FGRA *et al.*, 2015), entre otros.

Actualmente se reconoce que para sostener los servicios ecosistémicos en los ríos es necesario considerar su régimen natural de caudales y respetar su variabilidad hidrológica temporal a largo plazo (Dyson *et al.*, 2003), de esta forma se asegura la presencia de las diversas especies, las funciones y la capacidad de recuperación de los ecosistemas de agua dulce, así como los medios de subsistencia de las comunidades biológicas y humanas que dependen de ecosistemas saludables (Poff *et al.*, 2009).

Los ecosistemas acuáticos pueden permanecer saludables a través de la reserva de un volumen de agua, el cual es estimado en función de su régimen natural de caudales y destinado a mantener sus servicios ecosistémicos. Lo anterior posibilita atender la demanda de agua para los diversos usos y asegurarla para el futuro sin arriesgar la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos.

El volumen de agua reservado se denomina caudal ecológico; este concepto se refiere a la cantidad, calidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales (Barrios *et al.*, 2011; DOF, 2012b).

Se han desarrollado diversas metodologías para determinar el caudal ecológico; todas son eficaces si consideran el significado ecológico del régimen natural de caudales de los ríos, si generan propuestas para su conservación o restablecimiento (desde el punto de vista funcional) y si reconocen que un ecosistema acuático modifica sus componentes como respuesta al aumento de los niveles de estrés sobre el régimen hidrológico (Barrios *et al.*, 2011).

Tharme (2003) plantea una clasificación de metodologías para la determinación del caudal ecológico agrupada en métodos hidráulicos, hidrológicos, de simulación de hábitat y holísticos.

Los métodos hidrológicos se fundamentan en el vínculo que existe entre el régimen natural de caudales y el ecosistema asociado a éste, ya que las especies dentro del río se desarrollan adaptadas a las variaciones de caudal. En estos métodos se consideran principios y criterios que han surgido de estudios ecológicos detallados que confieren significados a los elementos del régimen hidrológico. Se desarrollan con datos históricos para hacer el análisis de los regímenes de caudales de décadas o de periodos de tiempo más largos (de la Lanza *et al.*, 2012). Los resultados obtenidos consisten en estimaciones de caudales fijos, expresados como caudales mínimos, o de intervalos de variabilidad del caudal (King *et al.*, 1999).

En diferentes regiones del mundo se han definido líneas de referencia para la determinación de caudales para el cuidado ambiental. Grecco y Salazar (2012), describen iniciativas que se han efectuado en algunos países, como en Estados Unidos, donde se aplican desde métodos porcentuales sencillos hasta técnicas sofisticadas de simulación hidráulica. En Inglaterra, se asignan caudales mínimos en función de las necesidades de las poblaciones piscícolas y la conservación de ecosistemas valiosos. La legislación suiza exige valores mínimos calculados con base en el caudal alcanzado o excedido durante el 95%

del periodo anual y considerando si los cuerpos de agua son para uso piscícola. En otros países como España, Irlanda, Grecia, Italia, Escocia y Brasil existen normas que regulan el caudal ecológico (Grecco y Salazar, 2012).

En México se han realizado diversos trabajos para definir los límites sustentables en el manejo del agua de varios sitios. Garrido *et al.* (2006) realizaron la estimación de la afectación potencial al caudal ecológico y la condición ambiental de los ríos de México. En Oaxaca, González-Mora *et al.* (2009) propusieron el caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco, como eje central del manejo del agua en dicha cuenca. En San Luis Potosí, Santacruz de León y Aguilar-Robledo (2009) realizaron la estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. Salinas-Rodríguez y Ramírez-Marcial (2010) obtuvieron la esorrentía media anual en cinco tramos de ríos de microcuencas dentro la Reserva de la Biósfera “El Triunfo”, para conocer la relación en la tendencia del escurrimiento interanual como indicador de alteración sobre la variabilidad del régimen hidrológico. Barrios-Ordóñez *et al.* (2011) elaboraron una propuesta para establecer un estándar nacional mexicano de flujo ambiental con tres niveles de análisis. En el estado de Chihuahua, Barrios-Ordóñez *et al.* (2011) determinaron el caudal ecológico del Río Conchos. Sánchez-Navarro y Barrios-Ordóñez (2011) calcularon el caudal ecológico para el río San Pedro Mezquital, Marismas Nacionales, Nayarit. En esta misma entidad federativa, de la Lanza-Espino *et al.* (2012) realizaron la medición del caudal ecológico del río Acaponeta, comparando distintos intervalos de tiempo de las series históricas de datos. Martínez-Zepeda (2012) determinó el régimen de caudales ambientales para la cuenca del río San Juan aplicando métodos hidrológicos. Rodríguez-Torres (2012) caracterizó la cuenca del río Verde, Oaxaca y determinó su caudal ecológico. Gómez-Balandra y Saldaña-Fabela (2012) refirieron los alcances y las aplicaciones de la norma de caudal ecológico. Gómez-Balandra *et al.* (2013a) realizaron la estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático y al riesgo ecológico en la cuenca del río Apatlaco, Morelos. Gómez-Balandra *et al.*

(2013b) realizaron el análisis comparativo de los métodos hidrológicos aplicados en la norma de caudal ecológico. González-Villela (2013) realizó la aproximación holística para el manejo integrado de las cuencas y el caudal ecológico. Palma-Raymundo (2013) estimó el caudal ecológico en la cuenca del río Yautepec, en Morelos, por otro lado identificó las consecuencias sociales y económicas implicadas si se retira el agua asignada a otros usuarios para destinarla a la conservación. En Querétaro, Olivera Toro-Maya (2013) realizó el pronóstico de las afectaciones ambientales ocasionadas por la construcción de presas utilizando el cálculo del caudal ecológico en el Río Extoraz. Rodríguez-Torres y Gómez-Balandra (2013) caracterizaron el régimen de caudal natural para la asignación del agua en la cuenca del Río Verde, Oaxaca. Gómez-Balandra *et al.* (2014) analizaron la propuesta de estandarización de flujos ambientales y de ejemplos de los métodos hidrológicos presentados en la NMX-AA- 159-SCFI-2012. En Sinaloa, de la Lanza-Espino *et al.*, (2015) calcularon el flujo ambiental como sustento para la reserva de agua del Río Piaxtla.

El agua de los ríos de la CHRVA es gestionada con una visión orientada únicamente a satisfacer la demanda de los distintos usuarios. Esta forma de administrar el recurso hídrico carece de un manejo sustentable e integral que permita su aprovechamiento, teniendo en consideración la conservación de los bienes y servicios que estos ecosistemas proporcionan.

Con base en lo anterior y en consideración de la importancia que representa mantener la integridad ecológica de la CHRVA para asegurar los servicios ecosistémicos y el suministro de agua a las poblaciones humanas asentadas en la cuenca, el objetivo de este trabajo fue la estimación del presupuesto hidrológico, basado en los caudales ecológicos obtenidos con una metodología de análisis de datos históricos de escurrimientos, para determinar el régimen de caudales que preserve la funcionalidad de los ríos principales de dicha cuenca.

2 Justificación

La CONAGUA confiere a los diversos usuarios un volumen medio anual del líquido conforme al estudio de disponibilidad de aguas superficiales. Esta planeación concede un valor fijo de agua al año, un volumen que no fluctúa en función de los patrones de variabilidad natural intranual e interanual de caudales. En el caso de la CHRVA el volumen medio anual disponible es de 18,268.88 hm³ de agua.

El volumen medio anual que se concede para satisfacer la demanda de agua implica su sustracción sin límites sustentables, es decir el agua se extrae sin considerar la recuperación del régimen hidrológico, lo cual propicia una reducción o incluso la ausencia de los caudales naturales.

Esto supone una alteración grave, puesto que el régimen de caudales es determinante para mantener la estructura de las comunidades (Poff *et al.*, 1997) y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales. Cada vez son más evidentes, a nivel local, regional y global, los daños causados a los sistemas acuáticos continentales, producto del mal manejo del agua, orientado a satisfacer la demanda para los usos de la población humana, que se ha dado a lo largo del tiempo (Garrido *et al.*, 2010).

La CHRVA tiene una amplia extensión que representa una quinta parte de la superficie estatal y más de un tercio de la población total de Oaxaca. Lo anterior aunado a su importancia ecológica, que se explica por la presencia de Áreas Naturales Protegidas (ANP), Sitios Prioritarios para la Conservación y una baja presión de uso de agua (DOF, 2012b), la convierten en un sitio de relevancia para la toma de medidas que promuevan su conservación y restauración.

De acuerdo con el diagnóstico y priorización de cuencas hidrográficas de México (Cotler *et al.*, 2010) y a la priorización de regiones (FGRA, 2015), la CHRVA está catalogada como de gran importancia ecológica.

La publicación Estadísticas del Agua en México (CONAGUA-SEMARNAT, 2013) menciona que el Río Verde destaca en el escenario hidrológico nacional por ser uno de los 50 ríos y arroyos más importantes, que constituyen una red hidrográfica por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país.

De acuerdo a Arriaga *et al.* (2000) esta cuenca incluye en su territorio seis Regiones Terrestres Prioritarias (RTP), una Región Hidrológica Prioritaria (RHP) y tres Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (AICA).

El actual esquema de planeación para suministrar agua en la CHRVA, pone en riesgo la riqueza biológica mencionada y la estabilidad de los ecosistemas fluviales de la cuenca, así como de los ecosistemas dependientes de éstos y en consecuencia, de las vidas, los medios de subsistencia y la seguridad de las comunidades que habitan la cuenca.

Es prioritario implementar mecanismos de gestión de los recursos hídricos que provean el abastecimiento de agua de manera sustentable y equitativa, evitando el riesgo de afectar y reducir los servicios ecosistémicos que aporta la CHRVA como ecosistema.

La determinación del caudal ecológico se basa en consideraciones ecológicas necesarias para regular las extracciones de agua de los ríos, respetando su régimen natural de caudales, y privilegia la conservación y/o restauración evitando condiciones irreversibles de deterioro, que en consecuencia, perjudiquen la calidad de vida de las poblaciones humanas. El caudal ecológico determinado por la aproximación propuesta por la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte (Barrios-Ordoñez *et al.*, 2011; de la Lanza-Espino *et al.*,

2012, 2015; DOF, 2012b) es lo que en este trabajo se denomina presupuesto hidrológico.

3 Objetivos

General

Estimar el presupuesto hidrológico para mantener el régimen de variabilidad natural del caudal y la funcionalidad de los ríos principales de la Cuenca Hidrográfica del Río Verde Atoyac, con base en la determinación de los caudales ecológicos obtenidos a través de un método hidrológico.

Específicos

- Analizar la serie histórica de datos de escurrimientos de los ríos principales de las cuencas hidrológicas Atoyac-Salado, Atoyac-Tlapacoyan, Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde, que conforman la cuenca hidrográfica Río Verde Atoyac, para determinar el régimen natural de caudales
- Calcular los elementos de variabilidad del régimen de caudales de los ríos principales de las cuencas hidrológicas Atoyac-Salado, Atoyac-Tlapacoyan, Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde.
- Determinar el presupuesto hidrológico de las cuencas Atoyac-Salado, Atoyac-Tlapacoyan, Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde para proponer el régimen anual de caudales que mantenga la funcionalidad de los ríos principales.
- Incorporar con una visión integrada la estimación del presupuesto hidrológico con el marco ambiental de la Cuenca del Río Verde Atoyac.

4 Área de estudio

La CHRVA se encuentra ubicada al suroeste del estado de Oaxaca entre las coordenadas $96^{\circ} 16' 47''$ y $98^{\circ} 05' 42''$ longitud oeste y $17^{\circ} 37' 11''$ y $15^{\circ} 58' 46''$ de latitud norte (Figura 1). Su extensión es de $18,569 \text{ km}^2$ (Arriaga *et al.*, 2009), que representa el 19.8% de los $93,793.33 \text{ km}^2$ que abarca la superficie total del estado (INEGI, 2005). Existen 243 municipios en la cuenca, en los cuales viven 1,360,000 habitantes que representan el 36% de la población total del estado (INEGI, 2010b).



Figura 1. Ubicación de la Cuenca Río Verde-Atoyac y sus cuencas hidrologías.

4.1 Cuencas hidrológicas

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (CONAGUA-SEMARNAT, 2013); la CHRVA corresponde a la Región Hidrológica No. 20 (RH20) “Costa Chica Río Verde”, llamada así por la presencia del Río Verde, el más importante de la cuenca. Esta región hidrológica abarca territorio guerrerense en su lado occidental y territorio oaxaqueño en la porción oriental. El sistema hidrológico de esta región está constituido por los ríos Papagayo, Omitlán, Nexpa, Copala, Marquelia, Ometepec, Cortijos, La Arena, Atoyac y Verde, entre los más importantes (CONAGUA-SEMARNAT, 2011). La CHRVA se ubica en su totalidad dentro del territorio oaxaqueño.

La CONAGUA dividió y describió a la CHRVA (Figura 1), para efectos de su administración, en las siguientes cinco cuencas hidrológicas (DOF, 2007):

4.1.1 Río Atoyac-Salado

Tiene una superficie de 1,193.77 km² y se encuentra delimitada al norte por la región hidrológica número 28 Papaloapan, al sur por la cuenca hidrológica Río Atoyac-Tlapacoyan y la región hidrológica número 22 Tehuantepec, al este por la región hidrológica número 22 Tehuantepec y al oeste por la cuenca hidrológica Río Atoyac-Tlapacoyan.

4.1.2 Río Atoyac-Tlapacoyan

Tiene una superficie de aportación de 2,360.98 km² y se encuentra delimitada al norte por la región hidrológica número 28 Papaloapan, al sur por la cuenca hidrológica Río Atoyac-Paso de la Reina, al este por la región hidrológica número 22 Tehuantepec y la cuenca hidrológica del Río Atoyac-Salado y al oeste por la cuenca hidrológica del Río Sordo-Yolotepec.

4.1.3 Río Sordo-Yolotepec

Tiene una superficie de aportación de 7,840.78 km² y se encuentra delimitada al norte por las regiones hidrológicas número 18 Balsas y 28 Papaloapan, al sur por las cuencas hidrológicas Río La Arena 1 y Río Atoyac-Paso de la Reina, al este por la cuenca hidrológica Río Atoyac-Tlapacoyan y al oeste por las cuencas hidrológicas Río Santa Catarina y Río Cortijos 1.

4.1.4 Río Atoyac-Paso de la Reina

Tiene una superficie de 5,834.45 km² y se encuentra delimitada al norte por las cuencas hidrológicas Río Atoyac-Tlapacoyan y Río Sordo-Yolotepec, al sur por la región hidrológica 21 Costa de Oaxaca y la cuenca hidrológica Río Verde, al este por la región hidrológica 22 Tehuantepec y al oeste por las cuencas hidrológicas Río Sordo-Yolotepec y Río La Arena 1.

4.1.5 Río Verde

Tiene una superficie de 1,122.71 km² y se encuentra delimitada al norte por las cuencas hidrológicas Río La Arena 1 y Río Atoyac-Paso de la Reina, al sur por el Océano Pacífico y la región hidrológica número 21 Costa de Oaxaca, al este por la región hidrológica número 21 Costa de Oaxaca y al oeste por la cuenca hidrológica Río La Arena 2.

4.2 Zonas prioritarias para la conservación de la biodiversidad

Esta cuenca incluye regiones con atributos biológicos relevantes o con un bajo impacto antrópico lo cual las vuelve importantes para su conservación, preservación o restauración. Por tal razón, han sido consideradas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) como regiones prioritarias y como Áreas Naturales Protegidas (ANP) por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

4.2.1 Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) de México

Arriaga *et al.* (2000) identificaron áreas cuyas características físicas y bióticas favorecen condiciones particularmente importantes desde el punto de vista de la biodiversidad en diferentes ámbitos ecológicos. Las RTP corresponden a unidades físico-temporales estables desde el punto de vista ambiental en la parte continental del territorio nacional. Destacan por su riqueza ecosistémica y específica, además de una presencia de especies endémicas comparativamente mayor que en el resto del país. También poseen una integridad biológica significativa y una oportunidad real de conservación. La CHRVA incluye seis de estas regiones: Sierra del Norte Oaxaca-Mixe, Cerros Negro-Yucaño, Sierras Triqui-Mixteca, El Tlacuache, Bajo Río Verde-Chacahua y Sierra Sur, así como Costa de Oaxaca (Figura 2).

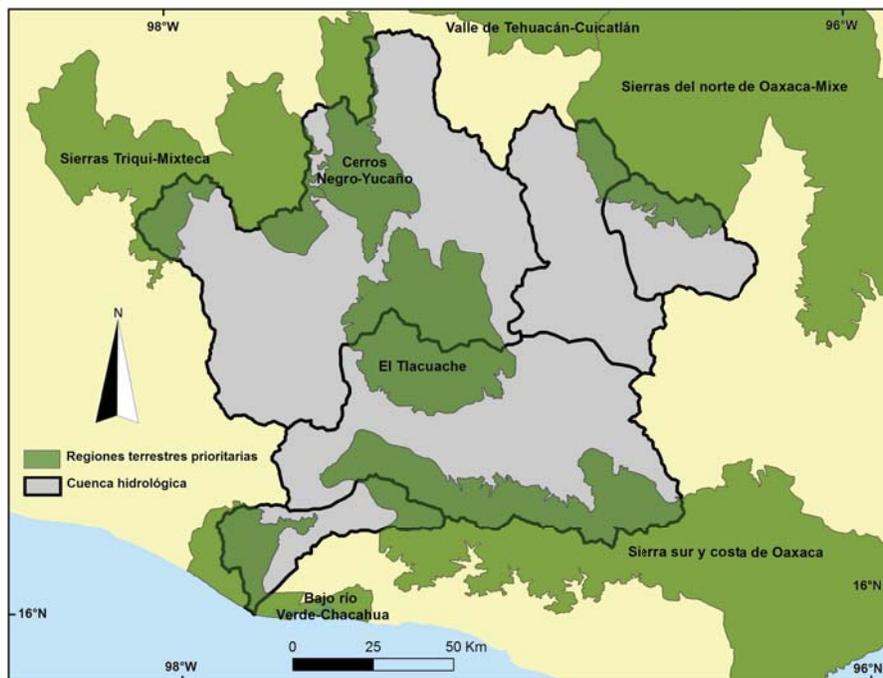


Figura 2. Regiones Terrestres Prioritarias en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.2.2 Regiones Marinas Prioritarias (RMP) de México

De acuerdo con Arriaga *et al.* (1998), en la CHRVA no hay RMP, sin embargo cerca de la cuenca hidrológica Río Verde se ubican las Lagunas de Chacahua, las cuales son sitios Ramsar y la RMP “Chacahua-Escobilla” (Figura 3).

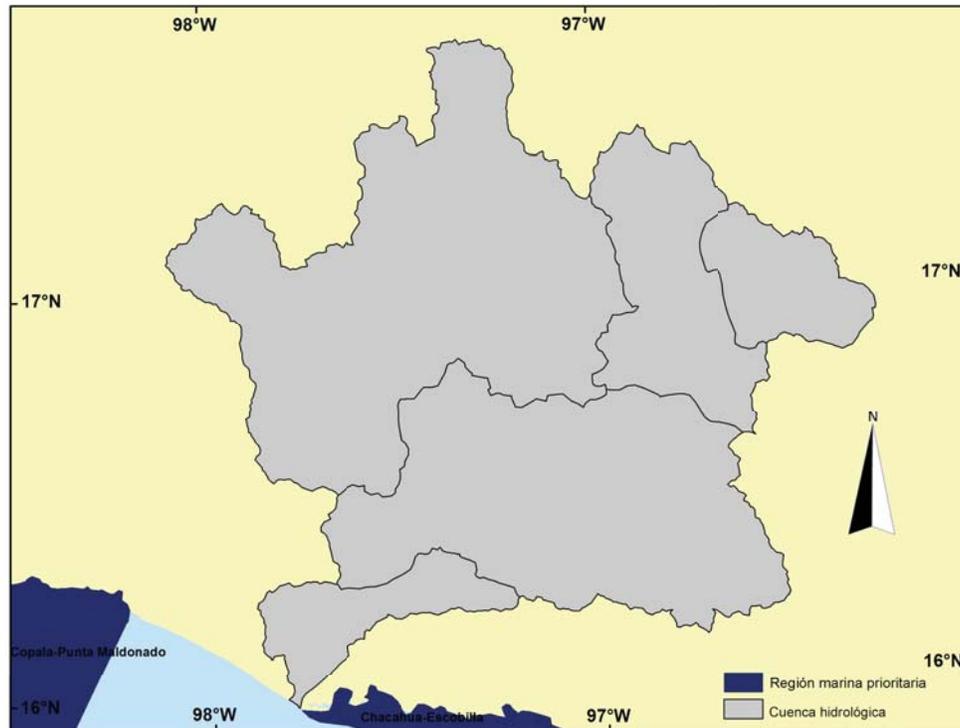


Figura 3. Región Marina Prioritaria próxima a la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.2.3 Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP) de México

Los criterios utilizados para la identificación de estas regiones se basaron en aspectos de la biodiversidad, el valor ambiental de recursos bióticos y abióticos, el valor económico, así como con los riesgos y amenazas a los que están sujetas las diversas cuencas hidrológicas. Se delimitaron 110 regiones hidrológicas en un área de 777,248 km² de las principales cuencas hidrográficas

del país (Arriaga *et al.*, 2002). La CHRVA incluye una RHP: Río Verde-Laguna de Chacahua (Figura 4).

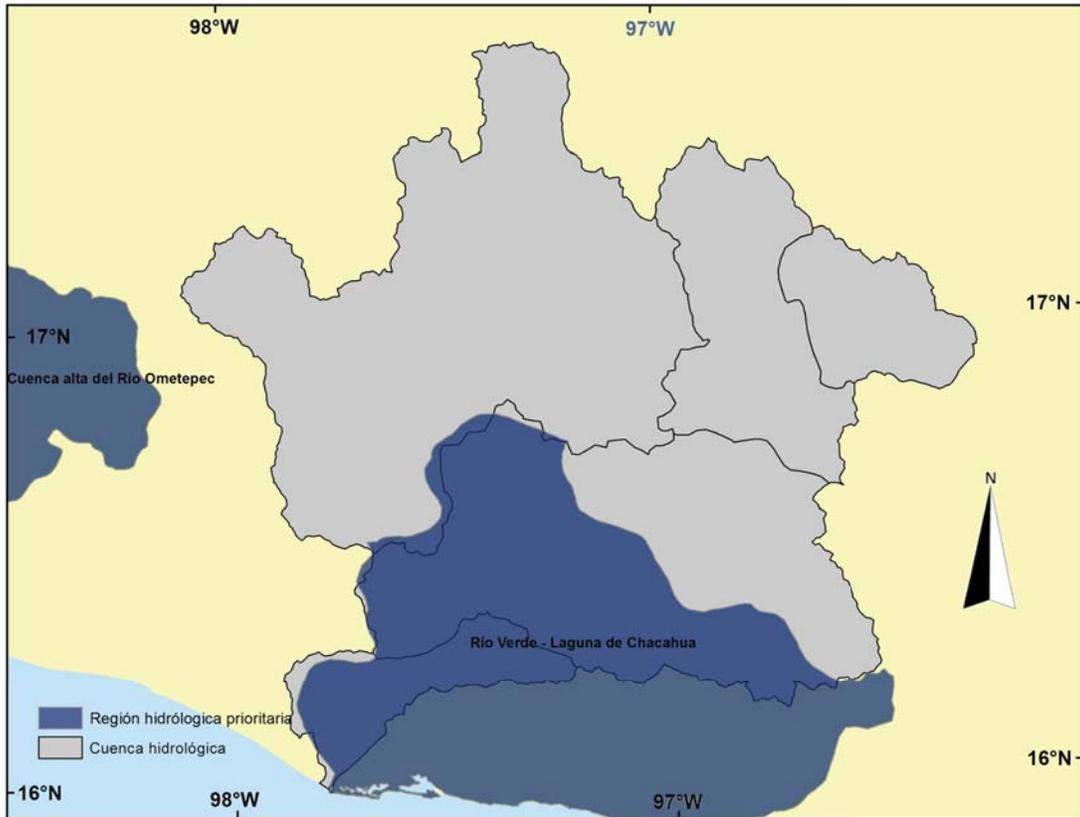


Figura 4. Región Hidrológica Prioritaria en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.2.4 Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (AICA)

Se designaron 219 AICA con una cobertura de 309,655 km². Estas áreas se encuentran en todos los estados de la República Mexicana, pero las AICA con las extensiones más grandes geográficamente se ubican en ocho estados, entre ellos Oaxaca (Benítez *et al.*, 1999).

La CHRVA incluye cuatro AICA: Tlaxiaco, Unión Zapata-Chinanteca, Sierra Norte y Laguna de Chacahua-Pastoría (Figura 5).

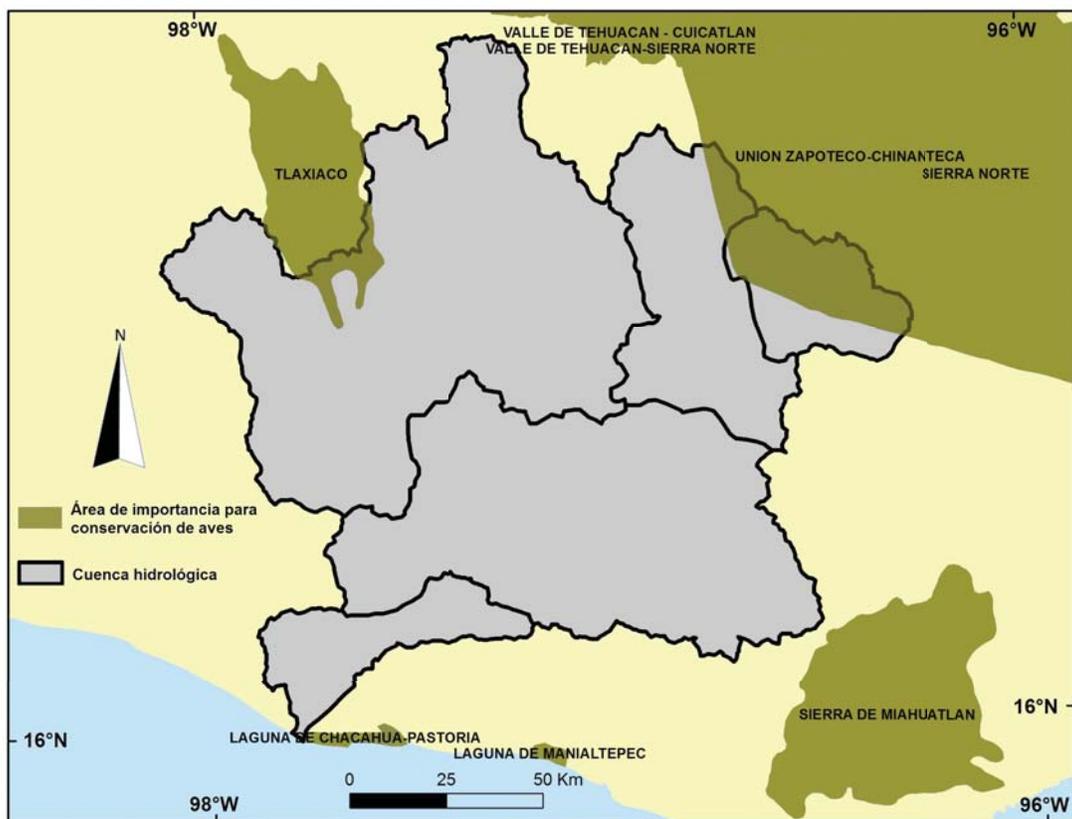


Figura 5. Áreas de Importancia para la Conservación de Aves en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.2.5 Áreas Naturales Protegidas (ANP) y sitios prioritarios

La CONANP declaró como ANP los siguientes sitios: Parque Estatal Cerro del Fortín decretado el 2004 (DOF, 2010), Monumento Natural Yagul decretado el 1999 (DOF, 2012), Parque Nacional Benito Juárez (DOF, 2013b) y Parque Nacional Lagunas de Chacahua (DOF, 2013c) decretados en 1937.

Las siguientes áreas fueron destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC) y certificadas por la CONANP como ANP: La Cruz Corral de Piedra (2006), El Negro-La Hierbabuena-El Capulín y la Huerta (2007), La Capitana (2010), El Campanario-Laancaloo Cruz y El Fuerte (2011).

Así mismo, la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA), analizó diversos indicadores para realizar una priorización integral de todas las cuencas bajo aspectos ambientales, meteorológicos, poblacionales y socio económicos. Como resultado el Comité de Agua de la FGRA seleccionó 10 sitios que designó como prioritarios y de los cuales forma parte la CHRVA (FGRA, 2015).

4.3 Clima

La CHRVA tiene una variedad de 18 tipos de clima, 19 tipos de suelo y 18 tipos de rocas que, en sus combinaciones, generan unidades de diversidad compleja.

De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1998), la CHRVA presenta una diversidad de climas que incluye el tropical con invierno seco, tropical monzónico, semiárido, semiárido cálido, templado y sus variaciones. El clima predominante en la CHRVA corresponde al tipo templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C.

Las temperaturas más frías oscilan entre -3°C y 18°C, así como las temperaturas más calientes bajo 22°C. El clima con menor presencia es del tipo semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperaturas más frías entre -3°C y 18°C, además la temperatura del mes más caliente bajo 22°C (Figura 6).

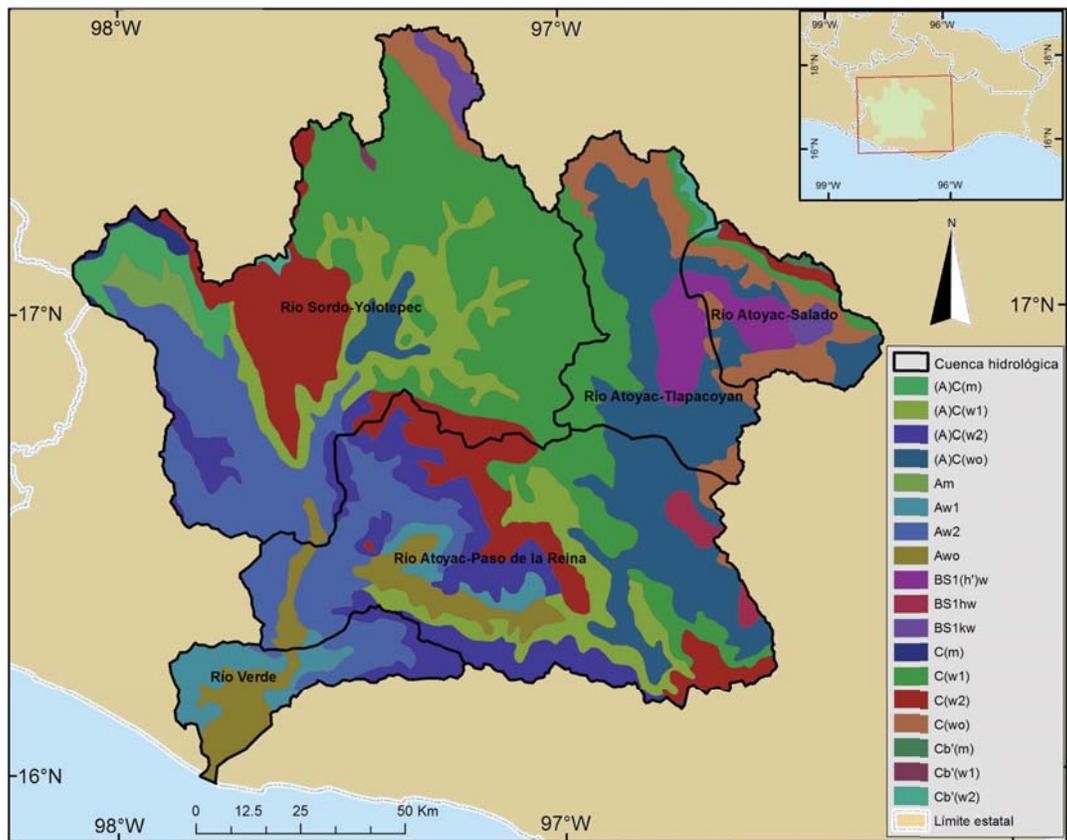


Figura 6. Clima en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.4 Geología

La fisiografía y composición del sustrato de la CHRVA, y de todo el estado de Oaxaca, es el producto de un proceso de más de mil millones de años que ha generado rocas tipo ígneas intrusivas y extrusivas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas metamórficas precámbricas son las más antiguas, actualmente forman una porción de la región centro, en donde se ubican las cuencas Río Atoyac-Salado y Río Atoyac-Tlapacoyan.

La mayoría de los elementos fisiográficos que se observan en la actualidad, tanto en la CHRVA como en el estado, se originaron por actividad volcánica y la formación de montañas asociadas al movimiento de grandes fallas en los últimos 65 millones de años. El entorno geológico del estado es complejo y variado, el conocimiento que se tiene cerca de sus rocas es preliminar y hay áreas, principalmente en las sierras, de las que se desconocen su edad y origen (Centeno, 2004).

De acuerdo con INEGI (2005), la conformación geológica de la CHRVA presenta rocas ígneas extrusivas (IE) e intrusivas (II) en un 26% de la superficie de la cuenca. Las rocas metamórficas (M) cubren el 33% de la superficie de la cuenca. Las rocas sedimentarias (S) cubren el 35% de la superficie de la cuenca (Tabla 1 y Figura 7).

Tabla 1. Geología de la Cuenca del Río Verde-Atoyac.

Cuenca hidrológica	Tipo de roca			
	IE	II	M	S
Atoyac-Salado	X	X	X	X
Atoyac-Tlapacoyan	X	X	X	X
Sordo-Yolotepec	X	X	X	X
Paso de la Reina	X	X	X	X
Verde		X	X	

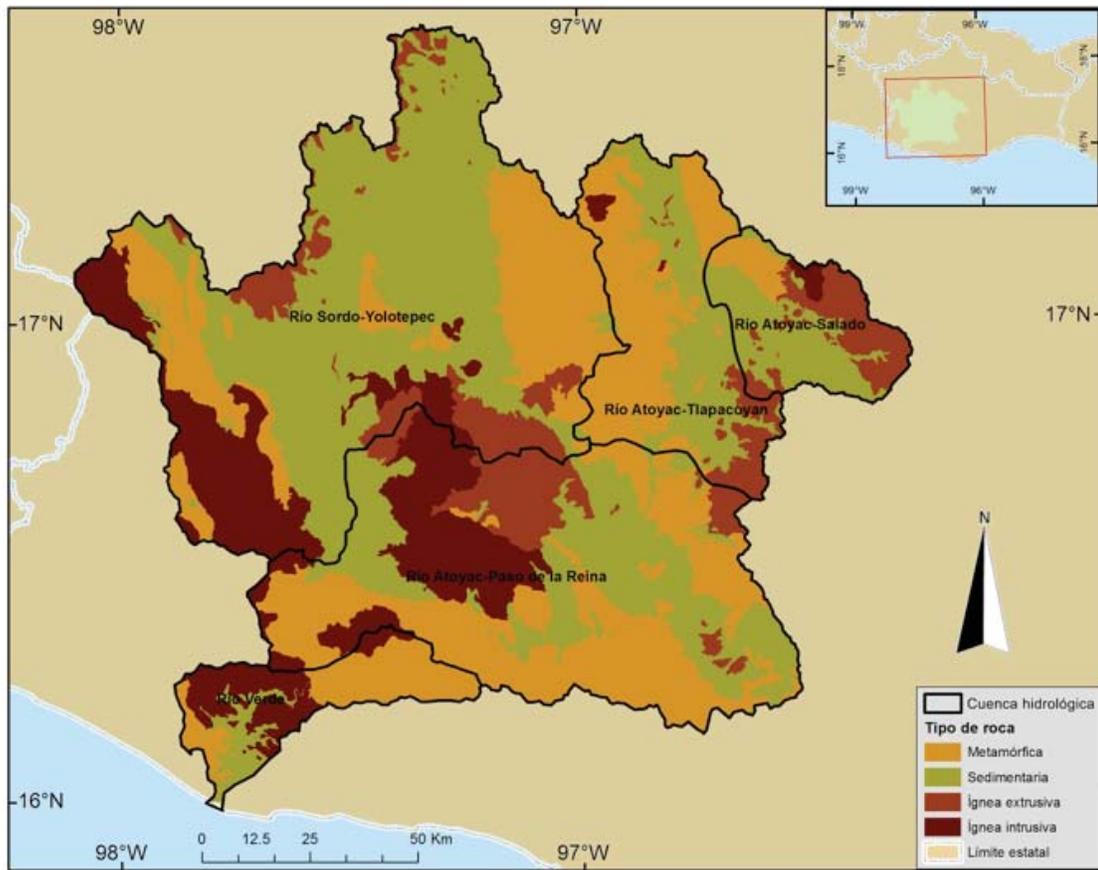


Figura 7. Geología en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.5 Precipitación

Vidal-Zepeda (1990) determinó que las lluvias en esta región se presentan en verano en los meses de junio a octubre con un intervalo de precipitación media anual de 400 a 4,000 mm de precipitación media anual. Los sitios donde se registró la mayor precipitación son muy localizados en las cuencas hidrológicas de los ríos Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde, alcanzando los 4,000 mm. Aproximadamente la mitad de la CHRVA oscila entre los 400 y 1,500 mm de precipitación media anual (Figura 8).

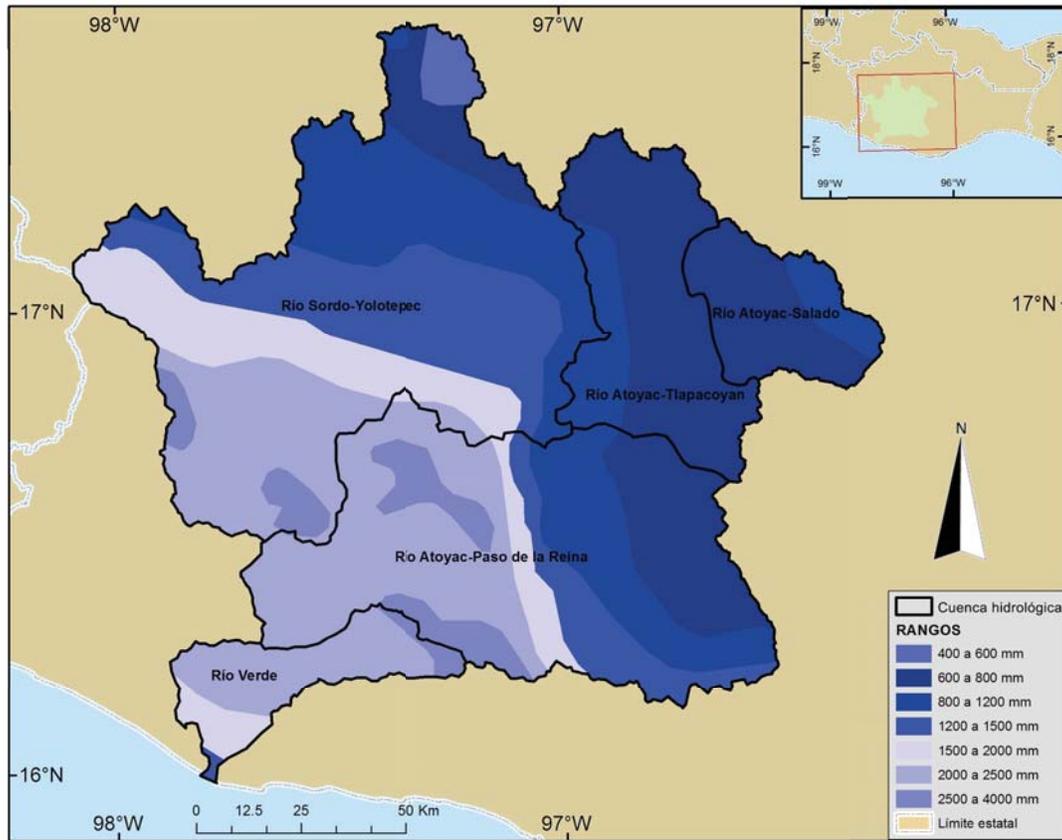


Figura 8. Precipitación en la Cuenca Río Verde Atoyac

4.6 Hidrología

La CHRVA es de tipo exorreica, desemboca en el mar cerca del Sistema Lagunar de Chacahua. Incluye aproximadamente 3,400 km de ríos perennes y más de 29,000 km de ríos intermitentes (INEGI, 2010c). La mayoría de sus tributarios son de tipo perenne y se encuentran en las cuencas hidrológicas de los ríos Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde.

Respecto a las aguas subterráneas, el acuífero de los Valles Centrales es el más conocido, con diferencias de datos en cuanto a su extensión según la fuente, de 4,200 km² (Belmonte *et al.*, 2005) hasta los 8,120 km² (CONAGUA-UABC, 2009). De la Rosa Sarmiento (2010) menciona que este acuífero representa el mayor suministro de agua para los Valles Centrales de Oaxaca

municipios de ETLA, Zaachila, Zimatlán, Ocotlán, Tlacolula y el centro de la ciudad de Oaxaca (Figura 9).

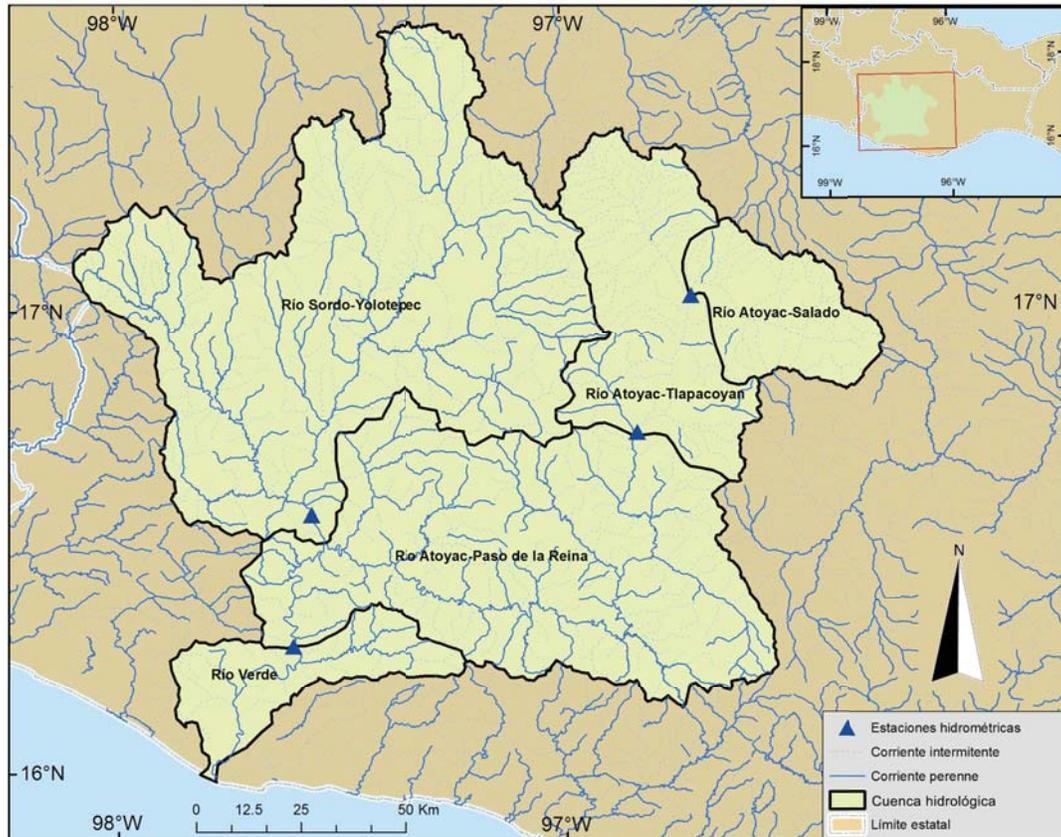


Figura 9. Hidrología en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.7 Áreas funcionales

El tipo de rocas, suelos, vegetación, clima y tipos de aprovechamiento de una cuenca, en articulación con su flujo de agua, nutrientes y energía, genera una estructura que puede delimitarse territorialmente en tres zonas funcionales, las cuales están vinculadas con la dinámica hidrológica al interior de la cuenca: 1) La zona de captación, de cabecera o cuenca alta. Son áreas aledañas a la divisoria de aguas o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. En esta zona se forman los primeros escurrimientos (arroyos) luego que los suelos han absorbido y retenido

toda el agua según su capacidad. 2) La zona de almacenamiento, de transición o cuenca media. Es una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los escurrimientos iniciales confluyen aportando diferentes caudales cuyas concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica diferirán en función de las actividades que se realizan en cada subcuenca; es un área de transporte y erosión. 3) La zona de descarga, de emisión o cuenca baja. Es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o bien en un lago. Se caracteriza por ser una zona de importantes ecosistemas, como los humedales terrestres y costeros, además de muy productiva para el uso agrícola y donde se acumulan los impactos de toda la cuenca (Cotler *et al.*, 2010 y 2013).

En la CHRVA la cuenca media es la preponderante en las cuencas de Atoyac-Salado, Atoyac-Tlapacoyan, Sordo-Yolotepec y Atoyac-Paso de la Reina. Únicamente en la cuenca del Río Verde se pueden apreciar condiciones de cuenca baja (Figura 10).

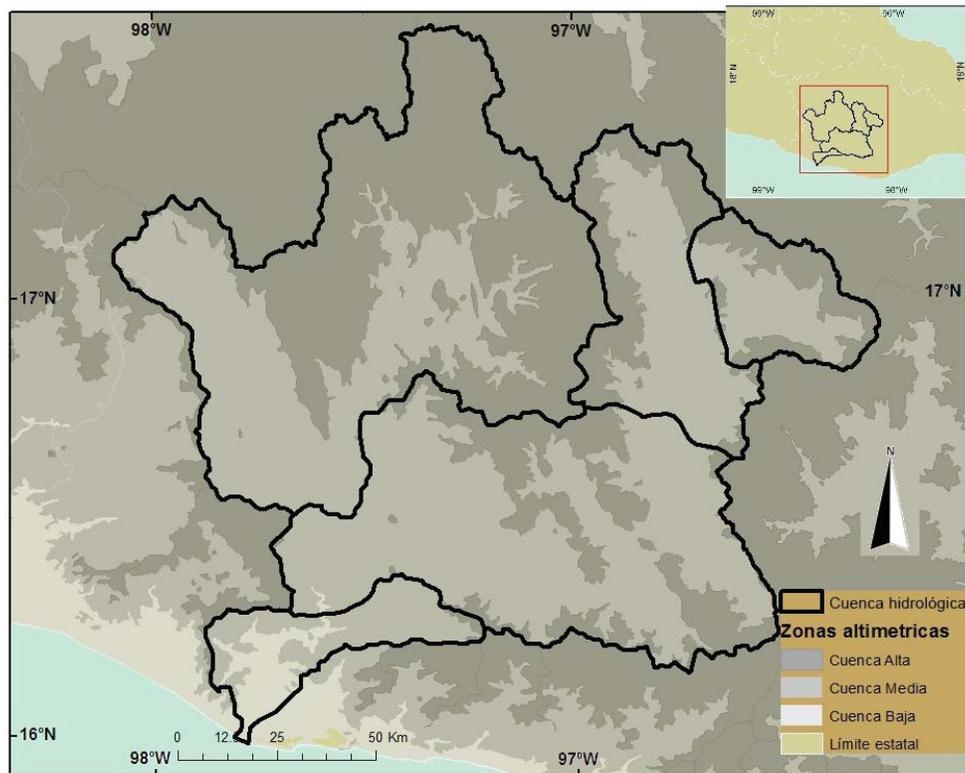


Figura 10. Zonas Altimétrica en la Cuenca Río Verde-Atoyac.

4.8 Vegetación

Existen en la CHRVA 17 tipos de vegetación de los 23 registrados para todo el estado de Oaxaca:

Bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de mezquite, bosque mesófilo de montaña, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de táscate, chaparral, manglar, palmar inducido, pastizal inducido, selva baja caducifolia, selva baja subcaducifolia, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, vegetación de dunas costeras y vegetación sabanoide, (INEGI, 2010a).

4.9 Fauna

La CHRVA alberga 950 especies de vertebrados, distribuidas en 85 especies de peces, 59 de anfibios, 113 de reptiles, 545 de aves y 148 de mamíferos (Casas *et al.*, 2004; González *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2004; Peralta *et al.*, 2011).

5 Metodología

Se realizaron recorridos de campo para constatar el estado ambiental de la cuenca. Se generó información cartográfica con los principales factores geográficos: geología, suelos, clima y vegetación así como cambio de uso de suelo para ubicar el marco ambiental y los servicios ecosistémicos de la CHRVA e incorporar con una visión integrada estos elementos al presupuesto hidrológico. Se construyó un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el software Arc Gis Desktop 10.3 y la cartografía digital del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2005, 2007, 2010a, 2010b, 2010c) y con información del banco de datos del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés).

La determinación del presupuesto hidrológico se obtuvo a través del análisis de 38,727 datos de aforo diario capturados en las EH, durante períodos variables de medición de 20 a 30 años, entre 1960 y 2002, según la cuenca analizada, cuyas características se presentan en la Tabla 2 (DOF, 2007).

Tabla 2. Área y disponibilidad anual por cuenca hidrológica

Cuenca hidrológica	Río principal	Ubicación de EH		Área (km ²)	Volumen disponible (hm ³ año ⁻¹)	Escorrentamiento por cuenca propia (hm ³ año ⁻¹)
		Latitud N	Longitud W			
Atoyac-Salado	Atoyac	17.027777	96.709722	1,193.77	57.55	75.64
Atoyac-Tlapacoyan	Atoyac	16.730555	96.833333	2,360.99	186.09	144.7
Sordo-Yolotepec	Verde	16.558333	97.566666	7,840.79	3,256.44	3345.56
Atoyac-Paso de la Reina	Atoyac	16.275000	97.608333	5,834.47	5,237.54	1819.83

Estas cuencas hidrológicas son las que CONAGUA considera para determinar el balance de disponibilidad y administrar el agua para satisfacer la demanda de los diferentes usuarios. Los datos de disponibilidad son del orden en que se presentan las cuencas, describe la dirección en que el agua discurre. La relación lineal entre el volumen de escurrimiento anual por cuenca propia (y) y el área (x) (Tabla 2) se describe con la ecuación $y = 0.4751x - 736.92$ obtenida con el método de los mínimos cuadrados con un coeficiente de determinación $R^2=0.98$.

Se obtuvieron las series históricas de los escurrimientos diarios de la CHRVA, del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS), para determinar la condición natural en cada cuenca hidrológica Esta información ha sido generada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en las estaciones hidrométricas (EH) bajo su circunscripción y es sistematizada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Con base en lo descrito por de la Lanza *et al.* (2012), se realizó el estudio del régimen natural de caudales mediante la aproximación hidrológica de la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte. Se determinaron el escurrimiento medio anual (EMA), caudal medio mensual (CMM), caudales mensuales en cuatro condiciones hidrológicas diferentes, caudal base, naturaleza de la corriente principal, existencia de alteración hidrológica y los regímenes de avenidas. Con esta información posteriormente se determinó el caudal ecológico de cada cuenca hidrológica.

5.1 Presión de uso

La presión de uso se calcula para conocer el nivel de extracción con el que se maneja el recurso para su aprovechamiento. Ésta se determina con la relación en porcentaje del volumen asignado (*Volum*) más el concesionado (*Volum2*) entre la disponibilidad media anual de la cuenca del río (*Dispon*). El volumen asignado es el destinado al uso público urbano o doméstico otorgado a los municipios, a los estados o al Distrito Federal, y el volumen concesionado es el autorizado a personas físicas o morales para el uso, aprovechamiento y explotación de las aguas que se encuentran en la superficie del territorio nacional como ríos, presas, arroyos, lagos, manantiales, esteros y canales, entre otros.

$$PU = \frac{(Volum) + (Volum2)}{Dispon} * 100$$

La presión de uso resultante se catalogó de acuerdo con la Tabla 3 (DOF, 2012b).

Tabla 3. Presión de uso

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

5.2 Importancia ecológica

Se determinó la importancia ecológica en cada cuenca hidrológica, con base en los criterios mencionados en la NMX-AA-159-SCFI-2012, como se muestra en la Tabla 4. Ésta se refiere a la intensidad de degradación de un ecosistema o de cierta área producida por actividades humanas, entre otras, y que tienen como consecuencia la pérdida o transformación de sus características estructurales y funcionales (DOF, 2012b).

Tabla 4. Importancia ecológica por cuenca

Cuenca hidrológica	Importancia ecológica
Atoyac-Salado	Alta
Atoyac-Tlapacoyan	Alta
Sordo-Yolotepec	Alta
Atoyac-Paso de la Reina	Media
Verde	Alta

5.3 Objetivo ambiental

El objetivo ambiental es el estado ecológico que se pretende alcanzar dentro de la cuenca hidrológica para mantener la integridad de los ecosistemas actuales o, cuando se considere que éstos están degradados, el que contribuya a su recuperación o rehabilitación (DOF, 2012b). El objetivo ambiental asignado para

la cuenca definió el estado de conservación deseado, relacionando la importancia ecológica (muy alta, alta, media y baja) y la presión de uso (baja, media, alta y muy alta) como indica la Tabla 5.

Tabla 5. 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				

Objetivos ambientales A=muy bueno, B= bueno, C= moderado, D= deficiente (tomado de la Lanza Espino *et al.*, 2012)

5.4 Esgurrimiento Medio Anual

Se determinó el Esgurrimiento Medio Anual (EMA) promediando todos los datos de la serie histórica de los caudales diarios.

5.5 Caudal Medio Mensual

Se obtuvieron los Caudales Medios Mensuales (CMM) sumando los esgurrimientos diarios de cada mes, los cuales son utilizados para obtener la distribución estadística que indica la naturaleza del río.

5.6 Condiciones hidrológicas

Se determinó el régimen de caudales ordinarios estacionales, diferenciando condiciones hidrológicas muy secas, secas, medias y húmedas. Se ordenó una

serie de caudales medios mensuales y se calcularon los percentiles 0, 10, 25 y 75 para el volumen de cada mes, ya que estos percentiles son estadísticamente representativos de las condiciones hidrológicas mencionadas (de la Lanza *et al.*, 2012).

5.7 Caudal Base

El caudal base es el caudal mínimo ocurrido en la serie histórica de datos completa. Se identificaron dichos valores y en los casos donde su valor fue de $0.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ se identificó el valor inmediato, un segundo mínimo.

5.8 Ecurrimiento Medio Mensual

El Ecurrimiento Medio Mensual (EMM) se obtuvo al promediar la suma de los caudales diarios mensuales de toda la serie histórica de datos ordenada en años naturales.

5.9 Naturaleza del río

Se analizó si la naturaleza del río es perenne o intermitente considerando el valor del Ecurrimiento Medio Mensual (EMM), el promedio de todos los CMM, con relación al valor del percentil 0 de la serie histórica de datos considerando las siguientes condiciones:

Percentil 0 > 10% del EMM = río perenne

Percentil 0 < 10% del EMM = río intermitente

5.10 Análisis de alteración de la variabilidad hidrológica

Consistió en determinar la variabilidad del régimen de volúmenes circulantes de agua, de manera mensual y anual, en su estado natural y actual así como el grado de afectación de este último sobre el primero. De esta forma, se comprueba si existe o no una afectación significativa a la variabilidad del

régimen hidrológico natural (RHN) (Barrios-Ordóñez *et al.*, 2011 y DOF, 2012b). La serie de datos de los CMM se dividió en dos bloques y ambas series se ordenaron en años naturales. El primer bloque contiene la serie de datos del período de tiempo más antiguo, correspondiente al RHN y el segundo la serie de datos del período de tiempo más reciente, correspondiente al régimen hidrológico actual o presumiblemente alterado (RHA).

Se verificó si los caudales circulantes más recientes, a manera mensual y anual, se encontraban contenidos en el régimen de caudal ordinario estacional definido por el valor de los caudales estacionales del percentil 10 y el valor de los caudales estacionales del percentil 90. Si el régimen alterado RHA cumplió en magnitud mensual y anual más de un 50% con relación al RHN, se consideraba hidrológicamente no alterado (Barrios-Ordóñez *et al.*, 2011).

5.11 Régimen de avenidas

Los eventos particulares del régimen de flujo con períodos de volúmenes de agua con una mayor magnitud son el régimen de avenidas. Se calcularon sus diferentes componentes: a) magnitud-frecuencia b) duración-momento de ocurrencia y c) tasa de cambio correspondiente a cada tipo de avenida.

a) Magnitud-Frecuencia

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. Posteriormente, se obtuvo el promedio de la magnitud de las avenidas ajustadas para los periodos de retorno indicados de la serie de datos. Para cada año natural, se obtuvo el caudal máximo diario, a partir del cual se determinó la magnitud de las avenidas, asociados a los diferentes periodos de retorno de acuerdo a las 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 cinco años (Tabla 6).

Tabla 6. Criterio para determinar la frecuencia de ocurrencia de avenidas tipo

Objetivo ambiental	Régimen de avenidas		
	Categoría I	Categoría II	Categoría III
Muy alto	10	6	2
Alto	5	3	2
Medio	3	2	1
Bajo	2	1	1

b) Duración-Momento

La duración representativa de los eventos de avenidas para cada categoría se obtuvo al contabilizar el número ocurrido de días consecutivos de flujos con un valor por encima de sus correspondientes umbrales. Para conocer el momento de ocurrencia se contabilizaron el número de estos eventos en cada mes.

c) Tasa de cambio

La tasa de cambio de los caudales diarios para los eventos de avenidas se determinó separando los días de avenidas en cada uno de los intervalos de tiempo considerados. Sobre esta serie se calculó la tasa de cambio entre días consecutivos, mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Tc	Tasa de cambio (%)
Q_i	Caudal medio en un día
Q_{i+1}	Caudal medio del día siguiente

5.12 Frecuencia de ocurrencia

De acuerdo con el objetivo ambiental definido para el río se consideraron las frecuencias de ocurrencia de cada condición hidrológica (Tabla 7) como criterio de ponderación para obtener el volumen anual del caudal ordinario estacional (de la Lanza-Espino *et al.*, 2012).

Tabla 7. Frecuencia de ocurrencia por condición hidrológica

TIPO DE REGIMEN DE CAUDALES ORDINARIOS ESTACIONALES				
OBJETIVO AMBIENTAL	MUY SECO	SECO	MEDIO	HÚMEDO
A	0.2	0.3	0.4	0.1
B	0.4	0.4	0.2	0
C	0.6	0.4	0	0
D	1	0	0	0

5.13 Caudal ecológico

Con base en los objetivos ambientales definidos y los principales aspectos del régimen natural de caudales analizados, se obtuvieron los resultados de caudal ecológico necesario para conservar el régimen hidrológico que contribuya a mantener la integridad ecológica de cada cuenca.

El volumen total de caudal ecológico dado por los caudales ordinarios estacionales se definió a partir del volumen anual de cada condición multiplicado por sus correspondientes frecuencias de ocurrencia, mediante la siguiente expresión (Barrios-Ordoñez *et al.*, 2011; de la Lanza-Espino *et al.*, 2012, 2015; DOF, 2012b):

$$V_{t_{Coe}} = (f_{CoeH} * V_{CoeH}) + (f_{CoeM} * V_{CoeM}) + (f_{CoeS} * V_{CoeS}) + f_{CoeMS} * V_{CoeMS}$$

Donde:

Vt_{Coe}	Volumen total del caudal ordinario estacional
f_{CoeH}	Frecuencia de ocurrencia de un régimen de condiciones hidrológicas húmedas
V_{CoeH}	Volumen del régimen de caudales ordinarios estacionales húmedos
f_{CoeM}	Frecuencia de ocurrencia de un régimen de condiciones hidrológicas medias
V_{CoeM}	Volumen total del caudal ordinario estacional de condiciones hidrológicas medias
f_{CoeS}	Frecuencia de ocurrencia de un régimen de condiciones hidrológicas secas
V_{CoeS}	Volumen total del caudal ordinario estacional de condiciones hidrológicas secas
f_{CoeMS}	Frecuencia de ocurrencia de un régimen de condiciones hidrológicas muy secas
V_{CoeMS}	Volumen total del caudal ordinario estacional de condiciones hidrológicas muy secas

El caudal ecológico final se completó con el cálculo de los caudales asociados al régimen de avenidas, de acuerdo con la NMX-AA-159-SCFI-2012 (DOF, 2012b), y utilizando la siguiente expresión:

$$Vfr = (Vt_{Coe}) + (Vt_{Ra})$$

Donde:

Vfr	Volumen final de reserva
Vt_{Coe}	Volumen total del caudal ordinario estacional condiciones hidrológicas húmedas
Vt_{Ra}	Volumen total del régimen de avenidas

Se determinaron los porcentajes de caudales ecológicos en relación con la disponibilidad establecida en el 2007 (DOF, 2007) y a la establecida en el 2013 (DOF, 2103a), la cual está vigente actualmente.

6 RESULTADOS

Se presentan los resultados generados en la CHRVA sobre los servicios ecosistémicos, el cambio de uso de suelo y vegetación así como el régimen natural de caudales por cada componente del análisis hidrológico.

6.1 Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos que provee la CHRVA varían en cada una de sus cuencas hidrológicas debido a las distintas condiciones ambientales como el clima, la precipitación, sus sistemas fluviales, fauna, tipo de vegetación y suelo entre otros aspectos, así como el crecimiento de los asentamientos humanos. Se realizó una descripción basada en las observaciones realizadas durante el recorrido por las cuencas y la ubicación de las EH de la CONAGUA en Atoyac-Salado (EH 20027), Atoyac-Tlapacoyan (EH 20026), Sordo-Yolotepec (EH 20021) y en la zona costera en la cuenca del Río-Verde, la cual no cuenta con una EH. No fue posible el acceso a la EH 20017, correspondiente a la cuenca Atoyac-Paso de la Reina, por lo que su descripción se basó en la información generada mediante la cartografía empleada en este trabajo así como en las tasas de cambio del tipo de vegetación y usos de suelo.

Con lo observado en las EH y la información analizada se determinó que los servicios ecosistémicos proporcionados por la CHRVA han disminuido o desaparecido en algunas porciones.

En la cuenca del Río Atoyac-Salado se encuentran los distritos de Tlacolula y Centro (de los siete que conforman los Valles Centrales del estado de Oaxaca). En este último se ubica la capital del estado, por lo que se observan contaminantes aportados por las localidades establecidas a lo largo del afluente del río. Estos son residuos sólidos que generan la proliferación de fauna nociva y la descarga de aguas residuales sin tratamiento lo cual provoca la poca o nula capacidad de autodepuración del agua, el exceso de nutrientes como nitratos o

fosfatos así como la disminución de cobertura vegetal natural que provoca el azolvamiento del río. En conjunto, todo lo anterior ha influido negativamente en la apariencia del paisaje por el mal aspecto y los olores desagradables que hay en dichas porciones del río. La extensión de la agricultura llegó a los límites que la inclinación del relieve lo permitió. La mayor parte de la zona tiene la presión de los asentamientos humanos y ya no existe vegetación original en condiciones naturales. La EH de la cuenca del Río Atoyac-Salado está ubicada en la porción funcional de cuenca media, dentro de la zona urbana que aumentó en el período analizado de los años 1970 a 1990. Las características naturales en esta porción del río están alteradas por la infraestructura construida para dotar de servicios urbanos a esta parte de la ciudad y por las obras de rectificación de cauces y dragado realizadas por la CONAGUA en el 2011, en las que se eliminó la vegetación original de la zona (Figuras 11 y 12).



Figura 11. Río Atoyac en el Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán.



Figura 12. Descarga de aguas negras al río Salado

En la cuenca del Río Atoyac-Tlapacoyan, se encuentran cuatro de los siete distritos que conforman los Valles Centrales Etna, Zaachila, Zimatlán y Ocotlán, éstos han ocupado gran parte de la cuenca media. De igual forma que en Atoyac-Salado, en algunas porciones del río los bordes fueron modificados por la CONAGUA en el 2011 con obras de dragado y rectificación; sin embargo el agua fluye a una velocidad que permite el transporte de materiales, como sedimentos y nutrientes, lo cual proporciona sustento a especies de flora y fauna (silvestre y doméstica) de la zona. El ganado y otros animales domésticos indican que este sitio es un área productiva. La EH se encuentra en una zona de agricultura y se distingue la presencia de pastizales en mayor medida que en la cuenca del Río Atoyac-Salado (Figura 13).



Figura 13. Río Atoyac-Tlapacoyan

La cobertura vegetal en la cuenca del río Sordo-Yolotepec es de tipo boscoso, hay vegetación de galería intacta que suministra capacidad hidráulica para que el río no se desborde, se recargue el acuífero de agua, y exista arrastre de sedimentos y nutrientes que generan una productividad pesquera para el consumo familiar y local. Su cauce y meandros no han sido modificados por lo que brindan soporte a una gran diversidad de flora y fauna. El flujo que circula tiene la capacidad de dilución así como de autodepuración de contaminantes, además de ser un sitio de recreación para la comunidad por su valor estético. No hay localidades cercanas a la EH que representen un impacto crítico al sitio. Es del conocimiento público la intención de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de realizar el proyecto hidroeléctrico Ixtayutla, en el municipio de Santiago Ixtayutla (SENER, 2010), la cual tendría efectos destructivos en la cuenca (Figuras 14 y 15).



Figura 14. Río Sordo-Yolotepec



Figura 15. Cuenca del Río Sordo-Yolotepec

En Atoyac-Paso de la Reina, la comunidad se ha dedicado a actividades productivas sin impactar los cauces del río por lo que se tiene capacidad hidráulica para el transporte eficiente de nutrientes y sedimentos. El estado de conservación de la vegetación da soporte a una gran variedad de flora y fauna además de otorgar un valor estético al sitio. Esta cuenca actualmente es amenazada por la intención de la Comisión Estatal del Agua (CEA) de construir la presa Bicentenario de la Independencia (Paso Ancho), para almacenamiento de agua con fines de abastecimiento público a la ciudad de Oaxaca. El proyecto se localiza aproximadamente a 100 km al sur de la ciudad mencionada, sobre el río Atoyac, 600 m aguas abajo de la confluencia con el río Sola de Vega. Esta obra amenaza la integridad de los ecosistemas acuáticos porque alterará el flujo del agua interrumpiendo la conectividad del río (Hernández-Hernández, 2011).

En la cuenca del Río-Verde, que forma parte de la planicie costera y se sitúa en el límite del Parque Lagunas de Chacahua, se observaron todos los servicios ecosistémicos: provisión de agua hacia el acuífero y para los diferentes usos; arrastre de sedimentos y nutrientes; el aporte de agua dulce, que contribuye al balance salino en la zona costera; productividad pesquera y ganadera, tanto de autoconsumo como de venta local; da soporte a diversas especies de flora y fauna por lo que es un lugar con vocación turística por su valor estético.

Esta cuenca, situada en el límite del Parque Nacional Lagunas de Chacahua (Arriaga *et al.* (1998), se encuentra también amenazada por la intención de la CFE de desarrollar el proyecto hidroeléctrico Paso de la Reina (SENER, 2010). Su ejecución aún está en discusión, ya que las comunidades potencialmente perjudicadas se han opuesto a la construcción y una resolución del comité de la SENER objetó el desarrollo del proyecto (Comité de información, 2011). La propia CFE ha identificado efectos negativos: 1) La formación de un embalse de 1,958 ha, 2) La obra civil, en donde se establece una poligonal que contempla una superficie de 290 ha destinadas para la construcción de campamentos y 3) La construcción de una presa de cambio de régimen que contempla la

afectación de 220 ha, su objetivo es regular el caudal que expulsaría la cortina principal (Hernández-Hernández, 2011). Lo anterior inevitablemente provocaría afectaciones a nivel ambiental, restringiendo o anulando los servicios ecosistémicos que proporciona esta cuenca (Figuras 16 y 17).



Figura 16. Río Verde



Figura 17. Lagunas de Chacahua.

Para definir la condición en que se encuentran los principales servicios ecosistémicos en las cuencas hidrológicas de la CHRVA se estableció una valoración acorde a lo observado así como a la información analizada.

En la Tabla 8 se muestra que conforme a la gradación hecha, la cuenca Sordo-Yolotepec obtuvo el mayor puntaje de la valoración porque en esencia es la cuenca menos impactada y por lo tanto los servicios ecosistémicos que otorga aún se encuentran intactos. La cuenca Atoyac-Salado es la de menor puntaje ya que es la cuenca más impactada por dar soporte a una gran concentración de asentamientos humanos y urbanización.

Tabla 8. Servicios ecosistémicos por cuenca hidrológica.

Servicios ecosistémicos/Cuenca		Atoyac Salado	Atoyac Tlapacoyan	Sordo Yolotepec	Atoyac Paso de la Reina	Verde
Provisión	Recarga anual	0	1	3	3	3
	Arrastre de sedimentos	0	2	3	3	2
	Transporte de nutrientes	0	2	3	3	2
Regulación	Asimilación y dilución de contaminantes	0	2	3	3	2
	Amortiguamiento de eventos de tormentas o sequías	0	2	3	2	3
Soporte	Transporte de sedimentos que generan hábitats y biodiversidad	0	3	3	3	3
Culturales	Recreación, educación y turismo	0	1	3	3	3
	Suma	0	13	21	20	18

Donde:

Número	Valoración
0	No existe
1	Escaso
2	Notable
3	Abundante

6.2 Cambio de uso de suelo y vegetación

Los cambios de uso de suelo han sido provocados por la actividad antrópica principalmente: por la reducción de los recursos forestales, la urbanización o la actividad agrícola y ganadera, entre otros factores. El crecimiento de la población, con el consecuente aumento de la demanda de los recursos naturales, ha generado algunas problemáticas en la CHRVA como la explotación del agua subterránea, erosión de los suelos, prácticas agrícolas contaminantes, la construcción de obras hidráulicas y el vertimiento de aguas residuales de origen urbano arrojadas a los cuerpos de agua superficiales (Villareal *et al.*, 2011). Estas problemáticas tienen mayor impacto en la parte alta de la cuenca, donde ha habido mayor degradación ocasionada por el crecimiento urbano en un lapso comprendido entre las décadas de los 70 a los 90 (Figuras 18, 19 y 20).

Se realizó un análisis de los cambios en el uso de suelo durante este periodo que abarca tres décadas (70, 80 y 90). En la CHRVA, los tipos de vegetación y uso de suelo predominantes fueron el bosque, la agricultura y el pastizal. Las de menor cobertura durante las tres décadas fueron las áreas sin vegetación, los cuerpos de agua y los asentamientos humanos.

En la década de los 70 el bosque cubrió la mayor extensión del territorio de las cuencas Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Atoyac-Tlapacoyan, sumaron el 55.37% de cobertura respecto al territorio total de la cuenca de 18,569 km² (Arriaga *et al.*, 2009). La agricultura cubrió el 20.79% y el pastizal el 12.63%. Los tipos de vegetación y uso de suelo con menor presencia fueron sin vegetación y otros tipos de vegetación con 0.01% y asentamientos humanos con el 0.05%. Respecto a este último existen registros sólo de las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan, por lo que no se puede estimar una tendencia con relación al resto de la CHRVA (Tabla 9).

Tabla 9. Superficie y cobertura vegetal en los 70.

Década de los 70										
Cuenca hidrológica	Río Atoyac-Salado		Río Atoyac-Tlapacoyan		Río Sordo-Yolotepec		Río Atoyac-Paso de la Reina		Río Verde	
Vegetación y uso de suelo	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)
Agricultura	46,204.4	2.5	82,501.0	4.4	179,677.5	9.7	63,786.1	3.4	13,859.8	0.8
Sin vegetación					192.6	0.0			3.6	
Bosque	43,639.1	2.4	97,321.2	5.2	439,510.5	23.7	416,699.9	22.4	31,072.2	1.7
Cuerpo de agua									249.1	0.0
Asentamientos humanos	496.2	0.0	423.4	0.0						
Otros tipos de vegetación					39,681.8	2.1	111.2	0.0	2,600.5	0.1
Pastizal	19,538.2	1.1	54,545.7	2.9	86,106.1	4.6	66,533.2	3.6	7,823.7	0.4
Selva	9,378.1	0.5	984.9	0.1	23,597.5	1.3	34,095.5	1.8	55,640.9	3.0

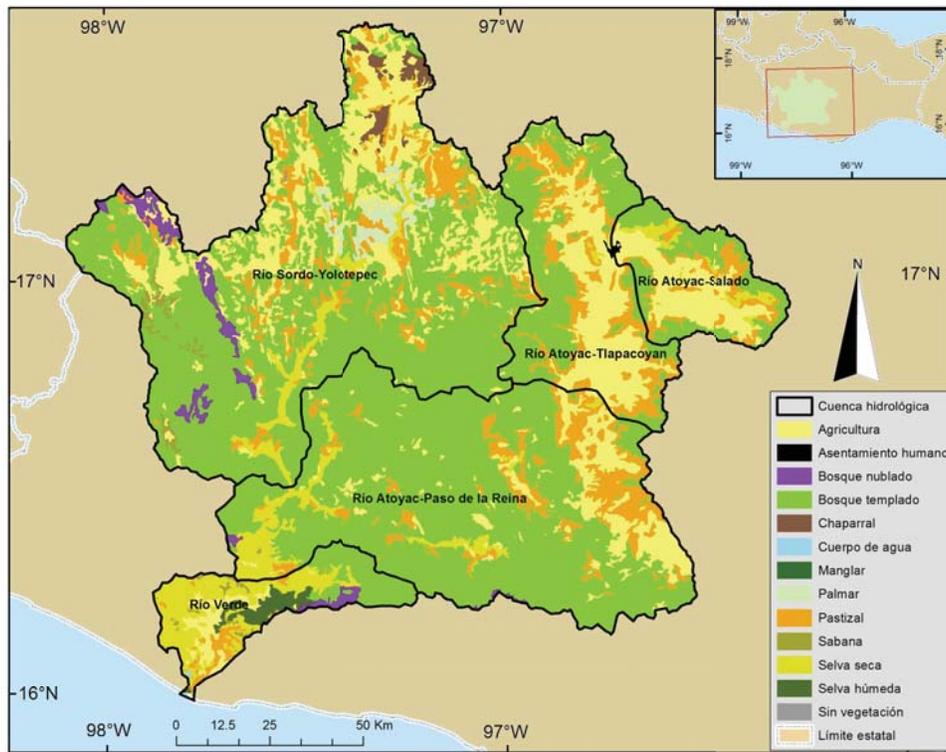


Figura 18. Uso del suelo y vegetación en la Cuenca Río Verde-Atoyac en la década de los 70.

En los 80 el bosque cubrió el 57.01%, la agricultura el 20.46% y el pastizal con 11.89%. Las menores coberturas fueron sin vegetación 0.05%, cuerpo de agua 0.07% y asentamientos humanos con el 0.69%. (Tabla 10).

Tabla 10. Superficie y cobertura de la vegetación y uso de suelo en los 80.

Década de los 80										
Cuenca hidrológica	Río Atoyac-Salado		Río Atoyac-Tlapacoyan		Río Sordo-Yolotepec		Río Atoyac-Paso de la Reina		Río Verde	
Vegetación y uso de suelo	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)
Agricultura	45,088.5	2.4	86,166.1	4.6	148,403.2	8.0	84,516.1	4.6	15,726.8	0.8
Sin vegetación					869.9	0.05			1.3	0.0001
Bosque	47,065.2	2.5	95,020.1	5.1	482,957.8	26.0	403,647.6	21.7	29,969.3	1.6
Cuerpo de agua									1,315.3	0.1
Asentamientos humanos	4,625.5	0.2	5,613.8	0.3	757.7	0.04	1,488.3	0.1	387.4	0.02
Otros tipos de vegetación	1,115.3				37,318.3	2.0	168.4	0.01	2,470.8	0.1
Pastizal	13,343.4	0.7	48,425.9	2.6	92,022.8	5.0	58,200.6	3.1	8,854.9	0.5
Selva	7,347.1	0.4	218.0	0.01	18,926.4	1.0	31,434.7	1.7	51,425.3	2.8

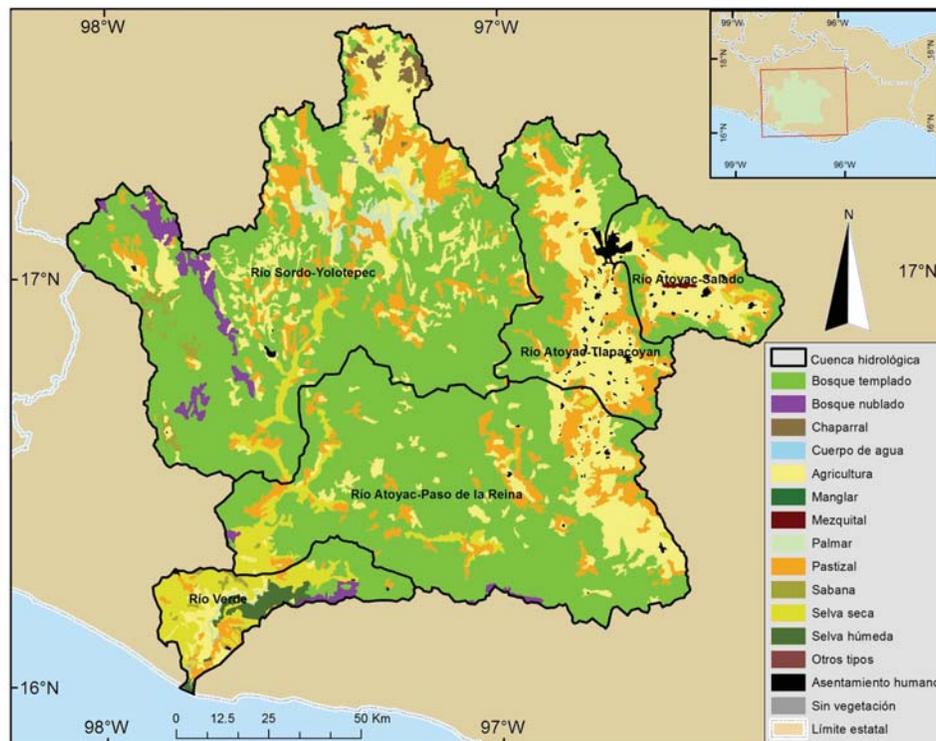


Figura 19. Uso del suelo y vegetación en la Cuenca Río Verde en la década de los 80.

En la década de los 90 el bosque cubrió el 53.3%, la agricultura el 22.98% y el pastizal el 15.34%. Las menores coberturas fueron sin vegetación 0.05%, cuerpo de agua 0.07% y asentamientos humanos con el 0.69%. Sin vegetación 0.03%, cuerpo de agua 0.08% y asentamientos humanos con el 0.73% (Tabla 11).

Tabla 11. Superficie y cobertura de la vegetación y uso de suelo en los 90.

Década de los 90											
Cuenca hidrológica	Río Atoyac-Salado		Río Atoyac-Tlapacoyan		Río Sordo-Yolotepec		Río Atoyac-Paso de la Reina		Río Verde		
Vegetación y uso de suelo	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	Superficie (ha)	Cobertura respecto a CHRVA en porcentaje (%)	
Agricultura	46,547.7	2.5	86,626.5	4.7	171,676.5	9.2	101,093.7	5.4	20,692.2	1.1	
Sin vegetación					477.1	0.03			2.4	0.0001	
Bosque	46,572.9	2.5	92,215.4	5.0	456,884.6	24.6	364,125.6	19.6	29,980.9	1.6	
Cuerpo de agua	10.9	0.001							1,454.2	0.08	
Asentamientos humanos	4,743.7	0.3	6,517.4	0.4	402.1	0.02	1,491.2	0.1	400.6	0.02	
Otros tipos de vegetación	1,125.1	0.1			30,863.4	1.7			1,259.0	0.1	
Pastizal	14,021.3	0.8	50,328.9	2.7	109,006.7	5.9	98,083.8	5.3	13,500.3	0.7	
Selva	6,239.4	0.3	96.5	0.01	13,237.0	0.7	16,452.4	0.9	44,382.1	2.4	

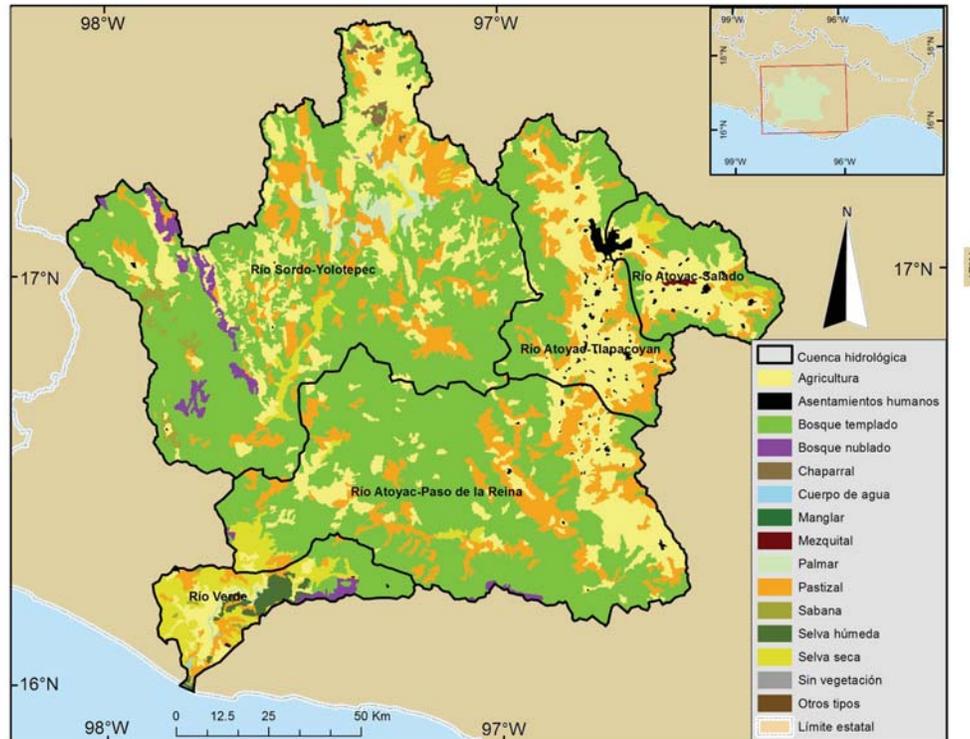


Figura 20. Uso del suelo y la vegetación en la Cuenca Río Verde en la década de los 90.

Se estimó el porcentaje de las tasas de cambio del tipo de vegetación y uso de suelo de la CHRVA conforme a las fórmulas expresadas en FAO (1996) e INE (2005). El análisis se realizó para determinar los cambios que han ocurrido en la cuenca en los períodos: de los 70 a los 80, los 80 a los 90 y los 70 a los 90. La tendencia general ha sido una disminución de las coberturas naturales de bosques y selvas, así como un aumento de las coberturas de uso antrópico: agricultura y asentamientos humanos (Tabla 12).

Como se muestra en la Tabla 12 los incrementos en el período de los 70 a los 80 de mayor magnitud en la CHRVA fueron respecto a los asentamientos humanos, cuyos registros existen sólo para las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan. El incremento más notable fue en Atoyac-Tlapacoyan (29.5%), Atoyac Salado presentó el segundo incremento de mayor magnitud (25%) en relación a toda la cuenca. Los mayores incrementos de las coberturas, después de los asentamientos humanos, corresponden a los cuerpos de agua de la cuenca del Río Verde (18.1%) seguido de áreas sin vegetación en Sordo-Yolotepec (16.3%). Las pérdidas de cobertura más significativas fueron en la cuenca del Río Verde; para la selva (-14%) seguida de áreas sin vegetación (-9.9%).

En la Tabla 12, se muestra que en el período de los 80 a los 90 la tasa de cambio respecto a los asentamientos humanos fue visiblemente menor a la década anterior, en Sordo-Yolotepec incluso se observa una pérdida de dichos asentamientos (-6.1%). La selva de Atoyac-Tlapacoyan nuevamente es el tipo de vegetación que sufrió una de las más altas pérdidas de cobertura (-7.8%). Se observó pérdida de cobertura en el bosque y la selva en todas las cuencas así como un incremento en la cobertura del pastizal en relación a la década anterior. La tasa de cambio más significativa fue la de la ganancia de cobertura de pastizal en Atoyac-Paso de la Reina (5.4%).

Asimismo en la Tabla 12 se muestra la estimación de la tasa de cambio en un periodo de 30 años, refleja lo ocurrido de la década de los 70 a los 90. En Atoyac-Tlapacoyan se estimó el mayor incremento de la cobertura para asentamientos humanos (9.5%) así como la pérdida más crítica de cobertura de selva (-7.5%).

Tabla 12. Tasa de cambio en porcentaje de la vegetación en la CHRVA.

Vegetación y uso de suelo	Atoyac-Salado			Atoyac-Tlapacoyan			Sordo-Yolotepec			Atoyac-Paso de la Reina			Verde		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Agricultura	-0.2	0.3	0.02	0.4	0.1	0.2	-1.9	1.5	-0.2	2.9	1.8	1.5	1.3	1.8	1.3
Sin vegetación							16.3						-9.9		
Bosque	0.8	-0.1	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.9	-0.6	0.1	-0.3	-1.0	-0.4	-0.4	-1.0	-0.1
Cuerpo de agua													18.1		
Asentamientos humanos	25.0	0.3	7.8	29.5	1.5	9.5		-6.1			0.02	-0.4		0.02	
Otros tipos de vegetación							-0.6			4.2			-0.5		
Pastizal	-3.7	0.5	-1.1	-1.2	0.4	-0.3	0.7	1.7	0.8	-1.3	5.4	1.3	1.2	5.4	1.8
Selva	-2.4	-1.6	-1.3	-14.0	-7.8	-7.5	-2.2	-3.5	-1.9	-0.8	-6.3	-2.4	-0.8	-6.3	-0.8

Donde:

Letra	Período de análisis
A	70 a los 80
B	80 a los 90
C	70 a los 90

6.3 Esguerrimiento Medio Anual

Por el arreglo espacial de las cuencas hidrológicas, se observaron incrementos del Esguerrimiento Medio Anual (EMA) conforme el caudal desciende hacia Atoyac-Paso de la Reina (Tabla 13). Se observa un incremento notorio en esta cuenca con un EMA 78 veces mayor que el de Atoyac-Salado, la primera cuenca del sistema hidrográfico del Río Verde Atoyac.

Tabla 13. EMA por cuenca hidrológica.

Cuenca hidrológica	Período	EMA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Atoyac-Salado	1972-1992	2.11
Atoyac-Tlapacoyan	1972-2002	5.64
Sordo-Yolotepec	1961-1991	104.79
Atoyac-Paso de la Reina	1960-1986	166.50

6.4 Caudal Medio Mensual

Se obtuvo el promedio de la serie histórica completa de los caudales medios mensuales (CMM) en cada cuenca. Los CMM mínimos en cada cuenca sucedieron entre los meses de enero y abril; los CMM máximos ocurrieron en el mes de septiembre (Tabla 14). El CMM total, correspondiente a la suma de los CMM de los 12 meses, fue de $756.02 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ en la cuenca Atoyac-Salado. Este valor se incrementó progresivamente hacia cuenca baja, alcanzando un CMM total de $59,610.9 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ en Atoyac-Paso de la Reina. El CMM de menor valor de la serie de datos fue en Atoyac-Salado con $4.11 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, en el mes de febrero y el máximo ocurrió en Atoyac-Paso de la Reina con $14,287.64 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, en el mes de septiembre.

Los CMM mostraron comportamientos similares en las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan, con respecto de las cuencas hacia la parte baja, Sordo-Yolotepec y Atoyac-Paso de la Reina, las cuales son de mayor superficie. En las primeras se observaron los caudales más bajos durante cuatro meses, de enero a abril (entre $4.11 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ y $14.41 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$), mientras que las segundas presentaron únicamente dos meses con caudales bajos con relación a su propio régimen en marzo y abril (entre $599 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ y $927 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$). En las dos primeras cuencas el estiaje fue más prolongado.

Tabla 14. Caudal Mensual por cuenca hidrológica.

Mes	CMM (m^3s^{-1})			
	Cuenca hidrológica			
	Atoyac-Salado	Atoyac-Tlapacoyan	Sordo-Yolotepec	Atoyac-Paso de la Reina
Ene	4.84	5.03	1,100.56	1,595.63
Feb	4.11	5.03	754.02	1,113.72
Mar	4.33	6.54	653.26	927.07
Abr	6.55	14.41	599.90	788.40
May	18.62	38.20	1,069.01	1,492.59
Jun	127.32	345.31	3,995.39	5,924.37
Jul	116.19	332.96	5,488.45	7,782.32
Ago	92.53	272.40	6,502.89	10,221.39
Sep	303.31	620.27	8,503.96	14,287.64
Oct	60.22	255.23	5,785.34	9,366.86
Nov	11.10	42.55	2,573.74	3,822.90
Dic	6.91	20.39	1,584.44	2,288.01
Total	756.02	1,958.32	38,610.96	59,610.90

Con base en los CMM totales, la cuenca Sordo-Yolotepec, la más extensa de la CHRVA (7,840 km²), aportó la mayor contribución al escurrimiento total de esta cuenca, con 61.5% (Tabla 15). La aportación de Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan fue del 1.3% y 2 % respectivamente.

Tabla 15. Caudal Medio Mensual total y su aportación al escurrimiento.

Río	CMM (m^3s^{-1})	Aportación acumulada del escurrimiento (%)	Aportación al escurrimiento por cuenca (%)
Atoyac-Salado	756.0	1.3	1.3
Atoyac-Tlapacoyan	1,958.3	3.3	2.0
Sordo-Yolotepec	38,610.9	64.8	61.5
Atoyac-Paso de la Reina	59,610.9	100.0	35.2
Total			100

6.5 Condiciones hidrológicas

En la cuenca Atoyac-Salado, los CMM mínimos para las condiciones hidrológicas muy secas, secas y medias ocurrieron en marzo, con escurrimientos de $0.46 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $0.92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $1.18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente. Para la condición hidrológica húmeda el mínimo valor se dio en febrero con $5.33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Los CMM máximos para condiciones hidrológicas muy secas, secas y medias ocurrieron en junio con escurrimientos de $12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $16.91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $22.31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente. Para la condición hidrológica húmeda, el máximo fue en septiembre con $501.80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabla 16).

Tabla 16. Condiciones hidrológicas para Atoyac-Salado (P=percentil).

Mes	CMM ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)			
	Condición hidrológica			
	Muy seca	Seca	Media	Húmeda
	P0	P10	P25	P75
Ene	1.24	1.34	3.32	5.76
Feb	0.92	1.33	1.77	5.33
Mar	0.46	0.92	1.18	5.74
Abr	0.59	1.14	1.74	8.48
May	2.23	4.42	6.40	22.98
Jun	12.00	16.91	22.31	128.40
Jul	5.72	11.60	20.74	158.06
Ago	6.18	9.41	12.22	46.98
Sep	7.06	9.98	13.93	501.80
Oct	1.84	4.13	7.53	70.27
Nov	2.50	3.15	4.70	14.23
Dic	1.01	1.10	3.28	7.98
Total	41.75	65.43	99.12	976.00

Para las condiciones hidrológicas muy secas, secas y medias, hubo una diferencia de dos meses (abril-mayo) entre la ocurrencia de los CMM mínimos y los máximos. Para la condición hidrológica húmeda la diferencia fue de seis

meses (marzo-agosto). En esta condición se observó que el CMM máximo ocurrió con un retraso de dos meses, en relación a la ocurrencia de los CMM máximo del resto de las condiciones; sin embargo, aportó un escurrimiento de dos órdenes de magnitud con respecto a los valores de diciembre a marzo. También se observó que en el mes de agosto hubo una reducción del 70% del escurrimiento con respecto al mes anterior.

En la condición hidrológica muy seca, no hubo escurrimientos en la cuenca Atoyac-Tlapacoyan en todo el año. Este escenario se presentó en los primeros cinco meses en la condición hidrológica seca y en los primeros tres meses de la condición media. El CMM mínimo para la condición seca se presentó en octubre con $7.62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; para la condición media en diciembre con $0.12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y para la húmeda en febrero con $4.11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabla 17).

Tabla 17. Condiciones hidrológicas para Atoyac-Tlapacoyan (P=percentil).

Mes	CMM (m^3s^{-1})			
	Condición hidrológica			
	Muy seca	Seca	Media	Húmeda
	P0	P10	P25	P75
Ene	0.00	0.00	0.00	5.02
Feb	0.00	0.00	0.00	4.11
Mar	0.00	0.00	0.00	6.71
Abr	0.00	0.00	0.37	20.07
May	0.00	0.00	11.55	56.83
Jun	0.00	14.57	59.73	364.77
Jul	0.00	21.37	73.59	327.59
Ago	0.00	17.57	39.00	269.51
Sep	0.00	35.57	90.73	793.01
Oct	0.00	7.62	19.69	294.56
Nov	0.00	0.00	2.73	44.40
Dic	0.00	0.00	0.12	13.85
Total	0.00	96.70	297.53	2,200.44

El comportamiento común en las cuatro condiciones hidrológicas fue la ocurrencia de los CMM mínimos entre febrero y abril, con un incremento propio del escurrimiento debido a la temporada de lluvias, de junio a octubre.

En la cuenca Sordo-Yolotepec, el CMM mínimo para la condición hidrológica muy seca ocurrió en febrero con $328.54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Para el resto de las condiciones, los mínimos fueron en abril, con $439.91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para la seca, $489.01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para la media y $668.90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para la húmeda (Tabla 18). Los CMM máximos se dieron en septiembre en las cuatro condiciones hidrológicas. En el mes de junio, en todas las condiciones hidrológicas, se incrementó notablemente el CMM respecto a su propio régimen, y partir de octubre, los caudales disminuyeron.

Tabla 18. Condiciones hidrológicas para Sordo-Yolotepec (P=percentil).

Mes	CMM ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)			
	Condición hidrológica			
	Muy seca	Seca	Media	Húmeda
	P0	P10	P25	P75
Ene	782.15	907.84	999.23	1,206.66
Feb	328.54	633.14	677.24	846.28
Mar	505.12	554.83	604.76	716.56
Abr	390.16	439.91	489.01	668.90
May	374.39	518.96	686.94	1,357.80
Jun	1,273.85	1,732.83	2,491.59	4,989.77
Jul	2,577.63	3,006.46	3,718.84	6,884.14
Ago	2,415.15	3,884.92	4,248.25	8,142.63
Sep	3,583.37	5,262.01	6,751.60	10,383.14
Oct	3,455.62	3,889.78	4,574.09	6,723.84
Nov	1,623.86	1,918.49	2,177.77	2,987.50
Dic	1,120.78	1,265.70	1,405.98	1,753.37
Total	18,430.60	24,014.85	28,825.30	46,660.58

Tabla 19. Condiciones hidrológicas para Atoyac-Paso de la Reina (P=percentil).

Mes	CMM ($m^3 s^{-1}$)			
	Condición hidrológica			
	Muy seca	Seca	Media	Húmeda
	P0	P10	P25	P75
Ene	948.80	1,280.84	1,478.99	1,811.67
Feb	695.40	829.26	964.15	1,226.91
Mar	587.00	716.76	770.87	1,044.42
Abr	264.10	491.02	633.84	900.75
May	463.70	697.34	925.88	1,978.47
Jun	2,146.10	2,380.81	2,836.03	7,258.27
Jul	3,298.10	3,957.84	4,872.16	8,679.54
Ago	2,984.80	5,123.07	6,447.72	12,601.26
Sep	4,730.70	7,154.73	9,533.93	19,331.57
Oct	4,458.10	5,339.06	6,702.70	11,711.75
Nov	1,894.70	2,486.89	3,276.92	4,153.22
Dic	1,284.20	1,885.14	2,045.28	2,510.32
Total	23,755.70	32,342.76	40,488.48	73,208.16

En la cuenca Atoyac-Paso de la Reina (Tabla 19), para todas las condiciones hidrológicas los CMM mínimos ocurrieron en el mes de abril, con valores entre $264.10 m^3 s^{-1}$ y $900.75 m^3 s^{-1}$. Los máximos se dieron septiembre con valores entre $4,730.70 m^3 s^{-1}$ y $19,331.57 m^3 s^{-1}$.

La tendencia general que se registró en la CHRVA fue el incremento del caudal de cuenca alta hacia la cuenca baja (Tabla 20); sin embargo, esto no ocurrió en Atoyac-Tlapacoyan para la condición hidrológica muy seca, en donde no se registró escurrimiento.

Tabla 20. Caudal Medio Mensual total (caudal anual) en las cuatro condiciones hidrológicas de las cuencas (P=percentil).

Cuenca hidrológica	CMM total ($m^3 s^{-1}$)			
	Condición hidrológica			
	Muy seca	Seca	Media	Húmeda
	P0	P10	P25	P75
Atoyac-Salado	41.75	65.43	99.12	976.00
Atoyac-Tlapacoyan	0.00	96.70	297.53	2,200.44
Sordo-Yolotepec	18,430.60	24,014.85	28,825.30	46,660.58
Atoyac-Paso de la Reina	23,755.00	32,342.76	40,488.48	73,208.16

6.6 Caudal base, naturaleza del río y alteración hidrológica

El caudal base de menor valor se dio en la cuenca Atoyac-Tlapacoyan ($0.03 m^3 s^{-1}$) y el mayor en la cuenca Sordo-Yolotepec ($328.5 m^3 s^{-1}$). El caudal base en los ríos de naturaleza intermitente fue menor a los de naturaleza permanente. Las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan (Tabla 21) no cumplieron con la condición establecida de que el percentil 0 (P0) fuera mayor al 10% del escurrimiento medio mensual (EMM), por lo que su naturaleza fue intermitente. Las corrientes principales de las cuencas restantes cumplieron el criterio y se identificaron como permanentes. La tendencia fue el incremento de los escurrimientos hacia cuenca baja, por lo que se esperaría que el caudal base de Atoyac-Tlapacoyan fuera mayor al de Atoyac-Salado; sin embargo fue menor.

Tabla 21. Caudal base, naturaleza del río por cuenca (P=percentil).

Cuenca hidrológica	Caudal base ($m^3 s^{-1}$)	P0 ($m^3 s^{-1}$)	Razón P0/EMM (%)	Naturaleza
Atoyac-Salado	0.46	3.48	5.5	Intermitente
Atoyac-Tlapacoyan	0.03	0.00	0.0	Intermitente
Sordo-Yolotepec	328.54	1,535.88	47.6	Permanente
Atoyac-Paso de la Reina	264.06	1,979.63	39.3	Permanente

Se analizaron los periodos del RHN y del régimen hidrológico presumiblemente alterado (RHA) en cada cuenca (Tabla 22). En Atoyac-Tlapacoyan el cumplimiento en magnitud mensual del CMM fue de 37.5% con relación al RHN, por lo que se definió como hidrológicamente alterado. Se observó que el CMM de esta cuenca (Figura 22) tuvo valores de 0 en los meses de enero y febrero, por lo que quedó por debajo del percentil 10 (P10), posteriormente en octubre rebasó el límite establecido por el percentil 90 (P90). El resto de las cuencas no presentaron evidencia de alteración hidrológica para las series históricas analizadas ya que el CMM quedó dentro de los límites de los percentiles señalados (Figuras 21, 22, 23 y 24).

Tabla 22. Alteración del régimen hidrológico de los ríos.

Cuenca hidrológica	Periodo RHN	Periodo RHA	Límite RHN P10	Límite RHN P90	Cumplimiento mensual (%)	Cumplimiento anual (%)	Alteración hidrológica
Atoyac-Salado	1972-1982	1983-1992	5.5	168.7	70.0	70.0	No
Atoyac-Tlapacoyan	1972-1992	1993-2002	30.58	590.45	37.5	100.0	Sí
Sordo-Yolotepec	1961-1981	1982-1991	2,077.92	4,798.15	56.0	78.0	No
Atoyac-Paso de la Reina	1960-1976	1977-1986	2,706.71	7,596.86	90.0	90.0	No

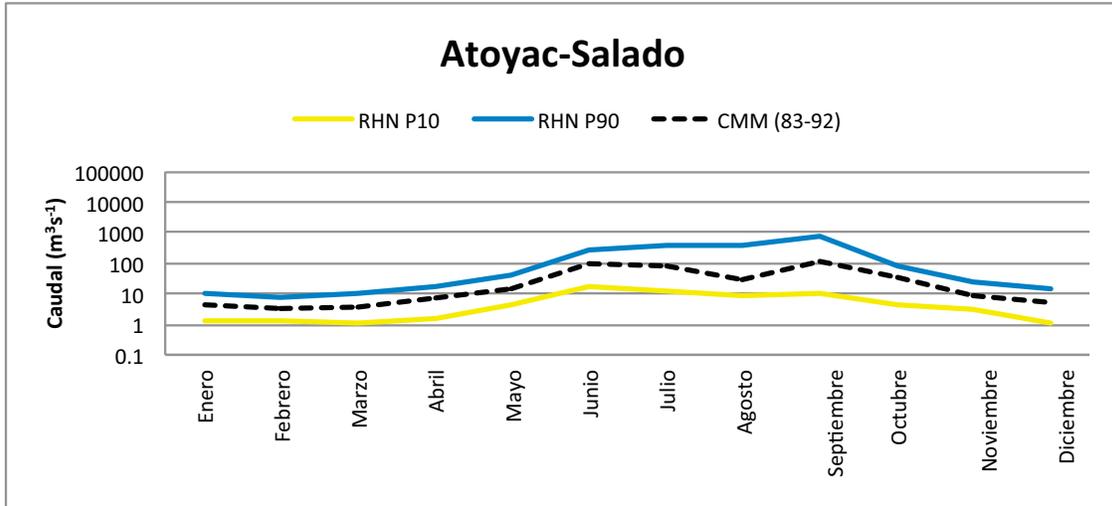


Figura 21. Alteración hidrológica interanual o mensual en Atoyac-Salado.

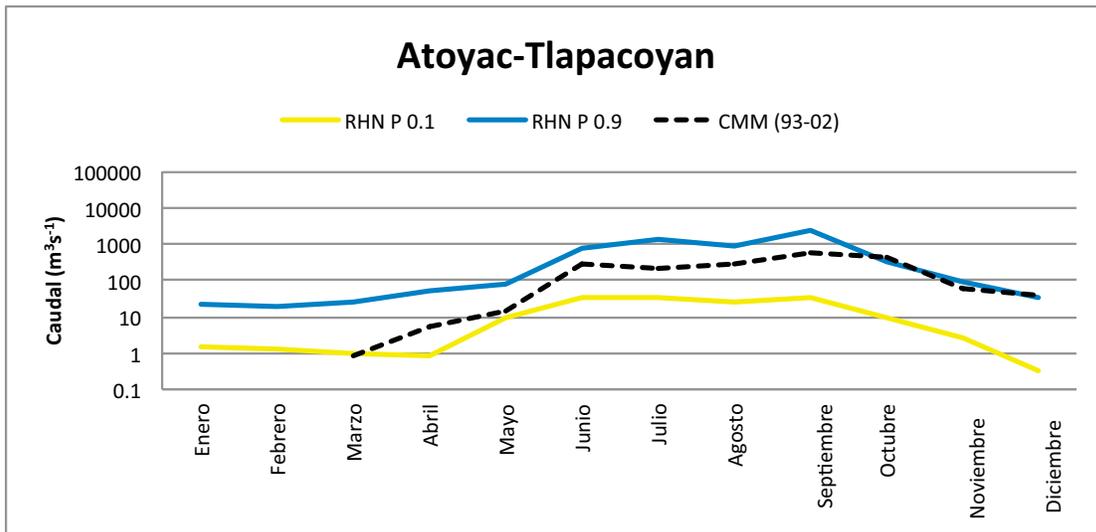


Figura 22. Alteración hidrológica interanual o mensual en Atoyac-Tlapacoyan

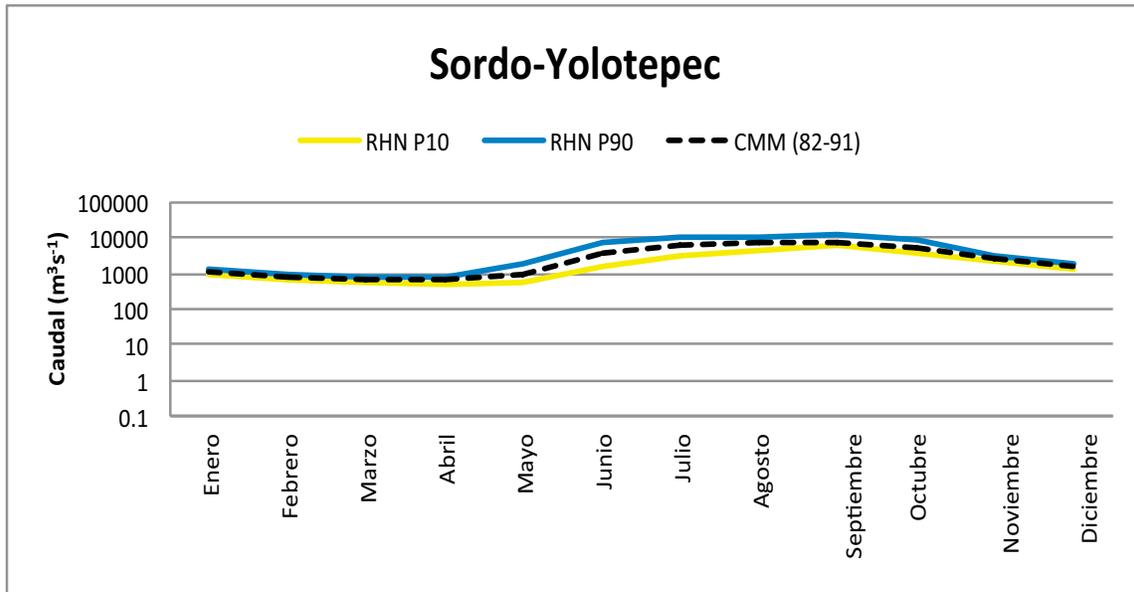


Figura 23. Alteración hidrológica interanual o mensual en Sordo-Yolotepec.

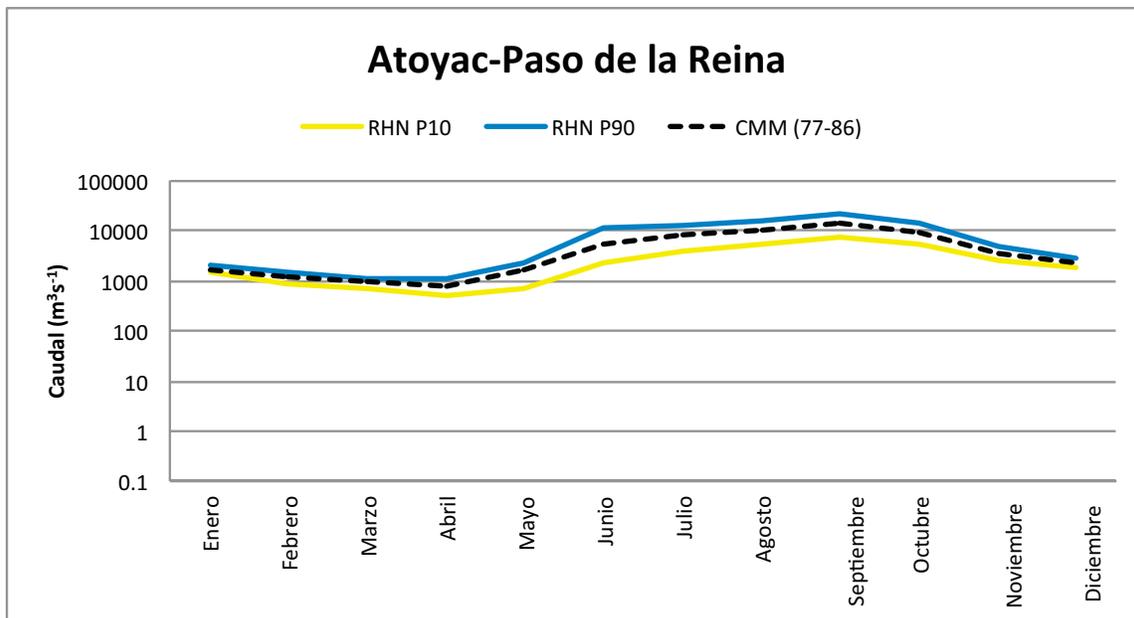


Figura 24. Alteración hidrológica interanual o mensual en Atoyac-Paso de la Reina.

6.7 Avenidas

Tabla 23. Caudal máximo anual por cuenca hidrológica.

Año	Caudal máximo anual (m ³ s ⁻¹)			
	Cuenca hidrológica			
	Atoyac-Salado	Atoyac-Tlapacoyan	Sordo-Yolotepec	Atoyac-Paso de la Reina
1960				1,085.63
1961			464.08	616.55
1962			723.02	886.92
1963			757.37	1,269.21
1964			794.40	878.33
1965			701.84	922.40
1966			402.11	703.00
1967			896.59	3,074.32
1968			532.84	666.92
1969			1,069.63	1,887.12
1970			768.87	1,366.43
1971			751.93	1,448.43
1972	36.89	88.33	445.29	978.45
1973	184.16	199.85	822.50	1,381.12
1974	178.91	201.23	1,362.93	4,891.69
1975	164.10	290.04	810.87	1,510.25
1976	49.11	189.62	525.23	906.74
1977	4.77	22.02	519.54	770.20
1978	29.63	62.72	536.04	765.67
1979	111.94	239.22	828.64	1,764.02
1980	89.38	155.10	732.26	1,311.34
1981	107.47	268.10	1,206.41	3,887.56
1982	22.94	36.70	261.84	308.19
1983	6.61	58.36	491.54	806.81
1984	64.07	253.28	1,129.59	2,068.05
1985	7.25	18.27	457.43	958.37
1986	22.72	64.42	795.79	372.31
1987	16.79	25.67	899.82	691.58
1988	200.81	58.32	901.14	
1989	40.00	107.28	491.48	
1990	12.30	8.67	898.72	
1991	78.18	11.93		
1992		4.83		
1993		69.93		
1994		87.63		
1995		233.28		
1996		39.17		
1997		71.63		
1998		18.27		
1999		64.42		
2000		25.67		
2001		68.25		
2002		197.82		

Nota: Los espacios vacíos corresponden a los años sin datos de aforo.

Los caudales máximos anuales (avenidas) en las series históricas de datos ocurrieron en 1988 para Atoyac-Salado con $200.81 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, en 1975 para Atoyac-Tlapacoyan con $290.04 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y en 1974 Sordo-Yolotepec con $1,362.93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y Atoyac-Paso de la Reina con $4,891.69 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, la mayor avenida de las cuatro cuencas (Tabla 23).

Los caudales de mayor volumen, de los flujos diarios en un año, se denominan avenidas anuales (Figura 25). Se observa una homogeneidad entre las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan, y por otra parte, fue similar entre las cuencas Sordo-Yolotepec y Atoyac-Paso de la Reina.

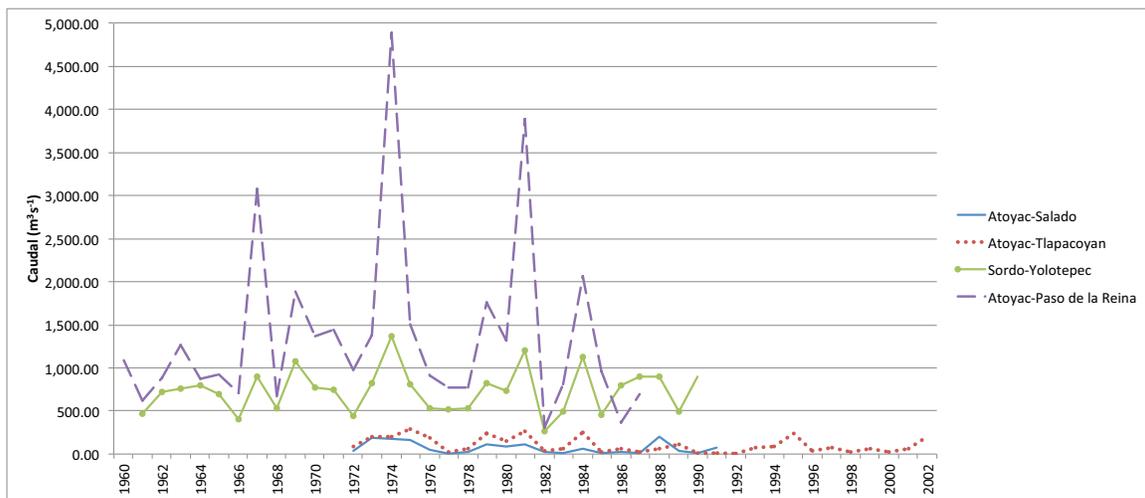


Figura 25. Caudal máximo anual de las cuencas hidrológicas y su año de ocurrencia.

La magnitud, duración, momento y frecuencia de ocurrencia del régimen de avenidas se calcularon para las tres categorías de acuerdo con los periodos de retorno de 1 (I), 1.5 (II) y 5 (III) años. En todas las cuencas las avenidas se presentaron entre los meses de junio a octubre, en concordancia con los CMM (Tabla 24).

Tabla 24. Componentes del régimen de avenidas de las cuencas hidrológicas.

Componente	Cuenca hidrológica												
	Atoyac-Salado			Atoyac-Tlapacoyan			Sordo-Yolotepec			Atoyac-Paso de la Reina			
	Categoría de avenidas												
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Magnitud (m^3s^{-1})	1	25	135	5	45	200	300	600	900	330	820	1,940	
Frecuencia de ocurrencia	5	3	2	5	3	2	10	6	2	5	3	2	
Duración (no. de días)	3	4	3	6	6	2	3	2	2	6	6	3	
Momento de ocurrencia	Jun-Oct												
Tasa de cambio (%)	Ascenso	192.6%			163.7			53.7			52.1		
	Descenso	-46.6%			-45.4			-29.5			-24.8		

El régimen de avenidas también evidenció comportamientos similares en Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan; por otra parte también, Sordo-Yolotepec y Atoyac-Paso de la Reina. Las mayores tasas de cambio tanto en ascenso como en descenso se obtuvieron para Atoyac-Salado.

6.8 Caudal ecológico por cuenca hidrológica

Se consideró la presencia e información de las regiones prioritarias terrestres, hidrológicas, AICA y ANP. Se determinó que la importancia ecológica es alta en todas las cuencas con excepción de Atoyac-Paso de la Reina que resultó media. La presión de uso fue media para las primeras dos cuencas y baja para las tres restantes (Tabla 25). El resultado fue que las cuencas Sordo-Yolotepec y Verde fueron las de mejor condición ecológica con objetivo ambiental A (estado ecológico muy bueno) y las otras tres presentaron objetivo ambiental B (estado ecológico bueno).

El EMA de las cuencas hidrológicas se tomó de la Tabla 13 y se transformó a unidades de hm^3s^{-1} porque los datos utilizados por la CONAGUA en los balances de disponibilidad y los procesos de administración del agua están expresados en esta unidad.

El EMA del Río Verde se obtuvo del estudio de disponibilidad de las aguas superficiales (DOF, 2013a) ya que no se cuenta con los registros diarios históricos

Tabla 25. Elementos para la determinación del caudal ecológico por cuenca hidrológica.

Cuenca hidrológica	Importancia ecológica	Presión de uso		Objetivo Ambiental	Corriente	EMA (hm ³ año ⁻¹)
		(%)	Categoría			
Atoyac-Salado	Alta	18.9	Media	B	Intermitente	66.67
Atoyac-Tlapacoyan	Alta	11.2	Media	B	Intermitente	177.85
Sordo-Yolotepec	Alta	1.35	Baja	A	Permanente	3,304.76
Atoyac-Paso de la Reina	Media	0.7	Baja	B	Permanente	5,250.80
Verde	Alta	0.7	Baja	A	Permanente	5,873.25

El presupuesto hidrológico de la CHRVA determinado a través de los caudales ecológicos (CE) finales (Tabla 26) se determinaron con los resultados obtenidos para los caudales estacionales ordinarios (Tabla 20), los del análisis del régimen de avenidas (Tabla 24) y las frecuencias de ocurrencia descritas en la NMX-AA-159-SCFI-2012 para cada cuenca, de acuerdo con sus objetivos ambientales.

La similitud de los dos grupos también se aprecia en la aportación del volumen del caudal ecológico final, es decir en el presupuesto hidrológico. Las cuencas de Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan fueron de dos órdenes de magnitud mientras que Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde fueron de cuatro órdenes de magnitud en cuanto al caudal ecológico final.

El presupuesto hidrológico, expresado como porcentaje del escurrimiento anual promedio (EAP), también agrupó las dos cuencas de la parte alta del Río Verde Atoyac, Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan, cuyos valores fueron los más bajos 22.7% y 13.3% respectivamente. El valor del caudal ecológico de mayor valor fue para la cuenca Sordo Yolotepec con 76.0% (Tabla 26).

Tabla 26. Presupuesto hidrológico (PH) para la CHRVA.

Cuenca hidrológica	Área (km ²)	Objetivo Ambiental	CE estacional ordinario	CE por régimen de avenidas	CE final	Escorrentamiento anual promedio (EAP)	Proporción de PH respecto del EAP (%)
Atoyac-Salado	1,193.77	B	62.69	112.50	175.19	771.61	22.7
Atoyac-Tlapacoyan	2,360.99	B	98.19	176.00	274.19	2,058.24	13.3
Sordo-Yolotepec	7,840.79	A	27,086.75	1,980.00	29,066.75	38,249.45	76.0
Atoyac-Paso de la Reina	5,837.47	B	30,537.08	3,630.00	34,167.08	60,773.23	56.2
Verde	1,122.71	A	37,970.17	6,096.00	44,066.17	67,977.43	64.8

Donde A= Muy bueno, B=bueno.

Las avenidas del Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan aportaron 1.79 veces más que el caudal ecológico de sus caudales ordinarios estacionales. Para Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso del Reina y Verde las aportaciones de las avenidas representaron sólo 0.07, 0.12 y 0.16 veces lo obtenido para sus caudales ordinarios estacionales.

La información que contienen los estudios de disponibilidad de agua superficial, la cual es necesaria para estimar el presupuesto hidrológico, sufrió algunas modificaciones. En el estudio del 2007 (DOF, 2007) están expresadas las variables del balance hídrico de las aguas superficiales de la CHRVA, de manera que se tiene conocimiento de los escurrimientos que ingresaban y egresaban de la cuenca hidrográfica. El estudio de disponibilidad vigente (DOF, 2013a) muestra el volumen de agua disponible por cuenca hidrológica pero no se evidencia el valor de los escurrimientos. Por otro lado los volúmenes de agua disponibles fueron incrementados. En el DOF 2013a en relación al DOF 2007, la cuenca Atoyac-Salado aumentó su disponibilidad 1.6 veces, Atoyac-Tlapacoyan aumentó 2.58 veces, Sordo-Yolotepec aumentó 0.97 veces, Atoyac-Paso de la Reina aumentó 1.03 y Verde 1.01 veces. Los cálculos realizados en este trabajo se elaboraron con base en el estudio de disponibilidad del 2007 ya que como se explicó anteriormente, en el estudio del 2013 se tiene conocimiento únicamente de los volúmenes de disponibilidad. En la Tabla 27 se muestra la proporción que representa el presupuesto hidrológico para la disponibilidad del 2007 y del 2013.

Tabla 27. Comparación entre las disponibilidades, los valores de escurrimiento y los presupuestos hidrológicos calculados.

Cuenca hidrológica	D (2007)	D (2013)	EAP	PH	PH/EAP	PH/D (2007)	PH/D (2013)
	(hm ³ año ⁻¹)				(%)		
Atoyac-Salado	57.55	92.44	66.70	15.10	22.6	26.2	16.3
Atoyac-Tlapacoyan	186.09	481.08	177.80	23.70	13.3	12.7	4.9
Sordo-Yolotepec	3,256.44	3,173.82	3304.80	2511.40	76.0	77.1	79.1
Atoyac-Paso de la Reina	5,237.54	5,430.32	5250.80	2952.00	56.2	56.4	54.4
Verde	5,784.41	5,873.25	5873.25	3807.30	64.8	65.8	64.8

D (2007)= Disponibilidad de agua según DOF 2007, D (2013)= Disponibilidad de agua según DOF 2013a,
 PH= Presupuesto Hidrológico, EAP= Escurrimiento Anual Promedio, PH= Presupuesto Hidrológico.

7 DISCUSIÓN

Para un estudio de presupuesto hidrológico es importante precisar los componentes de la variabilidad de este régimen, porque como señala el Paradigma del Río Natural (Poff *et al.*, 1997), para conservar la biodiversidad, producción y sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos, es necesario destacar el papel central de un medio físico variable.

Los componentes más notorios en la variabilidad del régimen natural de caudales de las cuencas hidrológicas que componen la CHRVA indicaron que la tendencia general fue el aumento de los niveles de los caudales de cuenca alta hacia cuenca baja y de las condiciones hidrológicas más secas hacia las húmedas. La cuenca hidrológica Atoyac-Tlapacoyan se salió de esta tendencia.

Al realizar el análisis del RHN y el RHA, se evidenció que hay alteración de la variabilidad del RHN en la cuenca Atoyac-Tlapacoyan. Barrios *et al.* (2011) y DOF (2012b) mencionan que la causa de la alteración a la variabilidad del RHN se debe a la presencia de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica. Sin embargo, en Atoyac-Tlapacoyan no existe tal, por lo que en este trabajo se plantea que la alteración fue causada posiblemente por una gestión inadecuada, que contempla la extracción de agua para cubrir la demanda sin tener en cuenta la sustentabilidad y eficiencia en el manejo. La consecuencia fue la ausencia de

escurrimientos con lo que el caudal base no se presentó en los meses de estiaje. Poff (1997) menciona que la extracción de agua de ríos y arroyos puede cambiar la magnitud, frecuencia y duración de los flujos de agua, por lo que la ausencia de escurrimientos en Atoyac-Tlapacoyan refleja que los elementos hidrológicos en esta cuenca sufrieron una modificación en relación con los escurrimientos naturales. Por otro lado es necesario considerar la influencia que tienen las extracciones de agua subterránea ya que el caudal base se nutre de éste y un déficit en los acuíferos inevitablemente repercute en la variabilidad del régimen hidrológico de un río. Flores-Márquez *et al* (2008) revelaron que hay un abatimiento de hasta 30 m para el 2001 en la porción de la cuenca donde se halla el acuífero del Valle de Etlá, el cual nutre las aguas superficiales de la ciudad de Oaxaca y municipios pertenecientes a los Valles Centrales. Indicaron que, si el actual régimen de extracción es mantenido, el abatimiento del agua superficial puede ser mayor.

Los resultados obtenidos por Rodríguez-Torres (2012) con la metodología hidrológica IHA-RVA (*Indicators of Hydrological Alteration–Range of Variability Approach*) no muestran alteraciones asociadas a extracciones importantes o presencia de infraestructura hidráulica para la cuenca. En este trabajo, realizado con el método hidrológico propuesto por la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, descrito por Barrios-Ordoñez *et al.* (2011), de la Lanza-Espino *et al.* (2012, 2015) y DOF (2012b), se determinó que sí existe alteración hidrológica en la cuenca Atoyac-Tlapacoyan. Como se mencionó, al no existir infraestructura hidráulica, se le atribuye este efecto a una gestión inadecuada del agua ya que se observó en el lecho del río la presencia de una estructura de concreto con la función de dividir el flujo del agua a diferentes sitios, para riego y para uso de la comunidad.

Un aspecto no considerado en el trabajo de Rodríguez Torres (2012) es la determinación de la naturaleza del río, intermitente o perenne, lo cual es importante por las implicaciones en su manejo.

El método IHA-RVA consiste en analizar indicadores de alteración hidrológica y del intervalo de variabilidad de las series de tiempo intra e interanuales de 33 parámetros hidrológicos (TNC-The Nature Conservancy, 2009). El desarrollo de esta metodología arroja resultados de compleja interpretación en comparación con el método hidrológico (Sánchez y Barrios, 2011; Barrios *et al.*, 2011; de la Lanza *et al.*, 2012) empleado en este trabajo, cuya aplicación requiere de insumos mínimos y una serie histórica de datos de al menos 10 años (de la Lanza *et al.*, 2015).

De acuerdo con la tendencia general, se esperaría que el caudal base de Atoyac-Tlapacoyan fuera mayor al de Atoyac-Salado, ya que los acuíferos siguen la conformación geológica de la cuenca y el flujo del agua es hacia cuenca baja por efecto de la gravedad (Cotler *et al.*, 2013); sin embargo en Atoyac-Tlapacoyan el caudal base es de menor valor.

La alteración hidrológica en la cuenca Atoyac-Tlapacoyan arriesga su funcionalidad ecosistémica ya que los patrones naturales y el régimen de avenidas determinan las características funcionales de los ecosistemas acuáticos y la presencia de las comunidades biológicas, por lo que constituyen sus valores de conservación (Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997; Postel y Richter, 2003; Jiménez *et al.*, 2005; Barrios *et al.*, 2011). Esta cuenca merece especial atención en su manejo, en primera instancia por la alteración de la variabilidad de su RHN, también por tener una presión de uso media del 11.2% y finalmente por ser un río de naturaleza intermitente.

De la misma manera que en el caso del régimen de avenidas, se observaron dos grupos bien diferenciados en cuanto a la similitud de los valores de las tasas de cambio, Atoyac-Salado con Atoyac-Tlapacoyan y Sordo-Yolotepec con Atoyac-Paso de la Reina. Esto se explica con base en el SIG generado en este trabajo,

las dos cuencas de la parte alta y las dos cuencas de la parte baja son similares entre sí en extensión, clima, geología y precipitación.

Las tasas de cambio, tanto de ascenso como de descenso, disminuyen de cuenca alta hacia cuenca baja, de manera que las mayores tasas se presentaron en la cuenca Atoyac-Salado. Lo anterior se debe a que las corrientes pequeñas son de respuesta más rápida que las corrientes de mayor magnitud.

Garrido *et al.* (2006) mencionan que la afectación potencial del caudal ecológico es media y la condición ecológica del sistema fluvial de toda la cuenca hidrográfica del Río Verde Atoyac es severa. Estas apreciaciones dan la pauta para determinar medidas urgentes para el manejo del agua, antes de que los impactos sean irreversibles y se arriesguen los servicios que la CHRVA provee.

Considerando que la cuenca hidrográfica es un sistema complejo, el efecto de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas terrestres impacta la dinámica hidrológica. De esta manera, en las décadas de los 70 a los 90, la cobertura de bosque (la cobertura vegetal de mayor extensión en la CHRVA) disminuyó para dar lugar a los pastizales, estos se transformaron en suelos para la agricultura y por último estas coberturas se convirtieron en sitios de asentamientos humanos. Estos cambios del uso suelo ocurrieron en mayor magnitud en las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan donde se ubican los mayores asentamientos poblacionales incluyendo la zona metropolitana de Oaxaca.

Los asentamientos humanos ejercieron una fuerte presión en los ecosistemas de las dos cuencas mencionadas debido a los procesos de urbanización y el incremento de la demanda de recursos para satisfacer las necesidades de la población, una de esas necesidades implica la extracción de agua para consumo de la zona urbana en continuo crecimiento. El análisis mostró que el RHN de Atoyac-Tlapacoyan está alterado y al no existir infraestructura hidráulica la causa

más probable que provocó esta alteración es la gestión inadecuada, que incluye extracciones de agua más allá del límite sustentable de la cuenca.

En el resto de las cuencas, Sordo-Yolotepec, Atoyac-Paso de la Reina y Verde, se presentó la misma tendencia de cambio de uso de suelo aunque en menor proporción y sin la amenaza de grandes asentamientos humanos que modifiquen significativamente los ecosistemas de la cuenca. En consecuencia estos sitios proveen más servicios ecosistémicos que las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan, en particular la provisión de agua.

En la Tabla 27 se muestran los valores que el estudio más reciente de disponibilidad oficial de agua (DOF, 2013a) establece una mayor disponibilidad del volumen de agua en cuatro cuencas.

En el caso de las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan el volumen es de 1.6 y 2.58 veces mayor respectivamente al volumen establecido en el estudio de disponibilidad del 2007 (DOF, 2007). La gestión del agua requiere especial atención porque existe una mayor cantidad de asentamientos humanos en ambos sitios. Por otro lado, Atoyac-Salado es la cuenca con el menor volumen de aportación respecto al resto de la CHRVA y el régimen hidrológico de Atoyac-Tlapacoyan está alterado. Al disponer de un volumen de más de una y dos veces mayor al establecido en el estudio de disponibilidad anterior (DOF, 2007) respectivamente las cuencas serían sometidas a mayor presión de la que ya se encuentran actualmente.

En las cuencas más grandes no determinaron cambios sustanciales y su presión de uso fue muy baja por lo que no estaría comprometida la funcionalidad de sus ríos principales.

Con la información anterior, comprendida en el período de 1960 al 2002 se manifiesta que el actual modelo de gestión del agua afecta la conservación de

los servicios ecosistémicos al no considerar un régimen de caudales destinado para permanecer en el ambiente y no poner énfasis en su variabilidad anual. Por esta razón, los presupuestos hidrológicos del presente trabajo pueden considerarse, en futuras planeaciones de la administración del agua, como límites de uso que promuevan la sustentabilidad de los ecosistemas acuáticos y aseguren la provisión de agua para las poblaciones.

La cuenca Sordo-Yolotepec debería considerarse con vocación exclusiva para la conservación porque tiene un objetivo ambiental A, asentamientos humanos que no representan una amenaza crítica al ecosistema con lo cual su presión de uso es baja y porque de acuerdo con la valoración que se hizo en este trabajo respecto a los servicios ecosistémicos observados esta cuenca conserva sus servicios ecosistémicos funcionales.

En caso de realizarse los proyectos de las presas Paso de la Reina, Ixtayutla y Paso Ancho tanto la CFE como la CEA deberían considerar un modelo de manejo del agua que contemple los resultados obtenidos en este trabajo para impactar en la menor medida posible la integridad ecológica de la cuenca.

8 CONCLUSIÓN

Las cuencas hidrológicas de la CHRVA presentan, en términos generales, alta importancia ecológica y baja presión, lo que las define como cuencas de vocación para la conservación con objetivos ambientales altos. Por esta razón es apremiante la aplicación de los presupuestos hidrológicos en la gestión del agua.

El presupuesto hidrológico requerido por las diferentes cuencas hidrológicas para mantener y recuperar la integridad ecológica es de 13.3% para Atoyac-

Tlapacoyan, del 22.7% para Atoyac-Salado, de 56.2% en Atoyac-Paso de la Reina, de 64.8% en Verde y de 76% en Sordo-Yolotepec.

El efecto de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas terrestres impacta la dinámica hidrológica. De esta manera, en las décadas de los 70 a los 90, la cobertura de bosque disminuyó para dar lugar a los pastizales, estos se transformaron en suelos para la agricultura y por último estas coberturas se convirtieron en sitios de asentamientos humanos. Estos cambios del uso suelo ocurrieron en mayor magnitud en las cuencas Atoyac-Salado y Atoyac-Tlapacoyan donde se ubican los mayores asentamientos poblacionales incluyendo la zona metropolitana de Oaxaca.

Los asentamientos humanos ejercieron una fuerte presión en los ecosistemas de las dos cuencas mencionadas debido a los procesos de urbanización y el incremento de la demanda de recursos para satisfacer las necesidades de la población. El impacto de los asentamientos humanos no es sólo terrestre, también afecta los cuerpos de agua ya que una de esas necesidades implica la extracción de agua para consumo de la zona urbana en continuo crecimiento. El análisis mostró que el RHN de Atoyac-Tlapacoyan está alterado y al no existir infraestructura hidráulica la causa más probable que provocó esta alteración es la gestión inadecuada, que incluye extracciones de agua más allá del límite sustentable de la cuenca.

Por esta razón, la cuenca Atoyac-Tlapacoyan necesita, de manera apremiante, una gestión que revierta la presión de uso del agua y el cambio de uso del suelo que ha sufrido, si continúa con el esquema actual de gestión los servicios ecosistémicos se perderán y con ello la calidad de vida de las poblaciones que habitan esta cuenca, la más habitada de la CHRVA, disminuirá.

Bajo el enfoque de cuenca para una gestión integrada, el presupuesto hidrológico en conjunto con un análisis detallado de los servicios ecosistémicos

debe orientar la gestión del agua, el manejo de recursos naturales y la regulación del cambio de uso de suelo.

Se sugiere un análisis detallado sobre la alteración hidrológica en la cuenca Atoyac-Tlapacoyan, que contemple la interacción con las aguas subterráneas para obtener mayor precisión de lo que ocurre en dicha cuenca.

El presupuesto hidrológico debe ser considerado en los estudios de disponibilidad para mejorar la gestión del agua, así como en las reservas de agua para la protección del ambiente. De esta manera se pueden asegurar los beneficios que las poblaciones reciben de la CHRVA.

9 Bibliografía

Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P (FGRA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA y Banco Interamericano de Desarrollo (BID). 2015. Reservas de agua para el ambiente. Programa Nacional de Reservas de Agua. México.

Almeida-Leñero, L., M. Nava, A. Ramos, M. Espinosa, M. J. Ordoñez, J. Jujnovsky. 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México Gaceta Ecológica, 84-85, julio-diciembre, pp. 53-64 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México.

Arriaga Cabrera, L., V. Aguilar Sierra, J. Alcocer Durand, R. Jiménez Rosenberg, E. Muñoz López, E. Vázquez Domínguez (coords.). 1998. Regiones Hidrológicas Prioritarias. Escala de trabajo 1:4 000 000. 2ª edi. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Arriaga, L., V. Aguilar, J. Alcocer, R. Jiménez, E. Muñoz y E. Vázquez (coordinadores). 2002. Regiones hidrológicas prioritarias. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Arriaga Cabrera, L., E. Vázquez Domínguez, J. González Cano, R. Jiménez Rosenberg, E. Muñoz López, V. Aguilar Sierra (coordinadores). 1998. *Regiones Marinas Prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Arriaga, L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*. Escala de trabajo 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Arriaga, L., Aguilar, V., Espinoza J. M., Galindo, C., Herrmann, H., H., Santana E., Graf Montero, S., Pisanty, I., Rosenzweig, L., Challenger, A., Cantú, C., Sánchez-Cordero V. 2009. Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad, en *Capital natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 433-457.

Arthington, A.H. 2002. Environmental flows: ecological importance, methods and lessons from Australia. Mekong Dialogue Workshop. International transfer of river basin development experience: Australia and the Mekong Region, 2 September 2002.

Baker, D.B., R.P. Richards, T.T. Loftus, and J.K. Kramer. 2004. A new flashiness index: Characteristics and Applications to Midwestern Rivers and Streams. *Journal of the American Water Resources Association* 40(2): 503-522.

Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). Subdirección General Técnica

(SGT). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com_wrapper&view=wrapper.

Barrios Ordóñez, J. E., R. Sánchez Navarro, S. A. Salinas Rodríguez, J. A. Rodríguez Pineda, I. D. González Mora, R. Gómez Almaraz, H. Escobedo Quiñones. 2011. Proposal for an environmental flows national standard. (<http://www.agua.org.mx/index.php/biblioteca-tematica/agua-y/agua-y-biodiversidad/1293-caudales-ecologicos/36710-proposal-for-an-environmental-flows-national-standard>). Consultado el 1 de agosto del 2015.

Barrios Ordóñez, J. E., R. Sánchez Navarro, S. A. Salinas Rodríguez, J. A. Rodríguez Pineda, I. D. González Mora, R. Gómez Almaraz, H. Escobedo Quiñones y J. A. Reyes González. 2011. Guía para la determinación de caudal ecológico en México. Programa de Manejo del Agua en Cuencas Hidrográficas: Desarrollo de nuevos modelos en México. Alianza WWF–Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México, 98 pp.

Belmonte, S., Campos J., M., Alatorre. 2005. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, México. *Geofísica Internacional*. 106 pp.

Benítez, H., C. Arizmendi y L. Marquez. 1999. Base de Datos de las AICAS. CIPAMEX, CONABIO, FMCN y CCA. México. (<http://www.conabio.gob.mx>). Consultado el 5 de enero del 2014.

- Bocco, G., M. Mendoza y O. R. Maser. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas. Boletín, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.
- Bunn, S. E. y A. Arthington A. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, 30 (4), pp. 492-507.
- Casas, G., Méndez de la Cruz, F., X. Aguilar. 2004. Anfibios y reptiles. En: García, A., Ordoñez, M., M., Briones (ed.). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund. México. 605 pp.
- Centeno, E. 2004. Configuración geológica del estado. En García A., Ordoñez, M., M., Briones (ed.). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wild Fund. México, pp 29-42.
- Comité de información. 2011. RES:CI-ORD-2011-158. Secretaría de Energía (SENER).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Dirección General del Organismo Pacífico Sur-Universidad Autónoma de Baja California (UABC). 2009. Convenio de colaboración SGT-OCPS-OAX-09-TT-01-RF-CC. Estudio de recarga artificial del acuífero Valles Centrales del estado de Oaxaca. Agosto 2009. 49 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos

Naturales (SEMARNAT). 2011. Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. 85 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. Estadísticas del agua en México, edición 2013. México, 165 pp.

Cotler-Ávalos, H. (coord.), A., Garrido Pérez, N., Luna González, C., Enriquez Guadarrama y M. L., Cuevas Fernández. 2010. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA). México, 231 pp.

Cotler-Ávalos, H., A. Galindo Alcántar, I. D. González Mora, R. F. Pineda López y E. Ríos Patrón. 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México. 31 pp.

Davies, S. P. y S. K. Jackson 2006. The Biological Condition Gradient: A Descriptive Model for Interpreting Change in Aquatic Ecosystems, 16 (4), pp 1251-1266.

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.

De la Lanza-Espino, G., S. A. Salinas Rodríguez y J. L. Carbajal Pérez. 2015. Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, dx.doi.org/10.14350/rig.35269. 14 pp.

De la Rosa-Sarmiento, I. C. 2010. Diseño óptimo de una red de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de Valles Centrales de Oaxaca. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR). Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Oaxaca, México.

DOF. 2007. ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas del Río Papagayo 1, Río Petaquillas, Río Omitlán, Río Papagayo 2, Río Papagayo 3, Río Papagayo 4, Río Cortés, Río Nexpa 1, Río Nexpa 2, Río Copala, Río Marquelia 1, Río Marquelia 2, Río Quetzala, Río Infiernillo, Río Santa Catarina, Río Ometepec 1, Río Ometepec 2, Río Ometepec 3, Río Cortijos 1, Río Cortijos 2, Río Cortijos 3, Río Cortijos 4, Río Ometepec 4, Río La Arena 1, Río La Arena 2, Laguna de Corralero (Estado de Oaxaca), Río La Arena 3 (Estado de Guerrero), Río Atoyac-Salado, Río Atoyac-Tlapacoyan, Río Sordo-Yolotepec, Río Atoyac-Paso de la Reina y Río Verde, mismos que forman parte de la región hidrológica número 20 Costa Chica de Guerrero. 19 de junio de 2007. 54 pp.

DOF. 2010. CONVENIO de Coordinación que con el objeto de establecer las bases para la instrumentación del proceso destinado a la formulación, aprobación, expedición, ejecución, evaluación y modificación del Programa Municipal de Ordenamiento Ecológico Territorial de Oaxaca de Juárez, suscriben la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Estado de Oaxaca y el Municipio de Oaxaca de Juárez. 28 de julio de 2010. Consultado el 31 de julio de 2015 http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5153495&fecha=28/07/2010.

DOF. 2012a. ACUERDO por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Monumento Natural Yagul. 27 de noviembre de 2012. Consultado el 31 de julio de 2015 http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5279228&fecha=27/11/2012.

DOF. 2012b. Norma Mexicana. NMX-AA-159-SCFI-2012. Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. 20 de septiembre de 2012.

DOF. 2013a. ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas del Río Papagayo 1, Río Petaquillas, Río Omitlán, Río Papagayo 2, Río Papagayo 3, Río Papagayo 4, Río Cortés, Río Nexpa 1, Río Nexpa 2, Río Copala, Río Marquelia 1, Río Marquelia 2, Río Quetzala, Río Infiernillo, Río Santa Catarina, Río Ometepec 1, Río Ometepec 2, Río Ometepec 3, Río Cortijos 1, Río Cortijos 2, Río Cortijos 3, Río Cortijos 4, Río Ometepec 4, Río La Arena 1, Río La Arena 2, Laguna de Corralero (Estado de Oaxaca), Río La Arena 3

(Estado de Guerrero), Río Atoyac-Salado, Río Atoyac-Tlapacoyan, Río Sordo-Yolotepec, Río Atoyac-Paso de la Reina y Río Verde, mismos que forman parte de la región hidrológica número 20 Costa Chica de Guerrero. 14 de junio de 2013. Consultado el 31 de mayo de 2015 http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5305774.

DOF. 2013b. ACUERDO por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Parque Nacional Benito Juárez. 27 de diciembre de 2012. Consultado el 31 de julio de 2015 http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5328236&fecha=27/12/2013.

DOF. 2013c. ACUERDO por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Parque Nacional Lagunas de Chacahua. 11 de noviembre de 2013. Consultado el 31 de julio de 2015 http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5321567&fecha=11/11/2013.

Dyson, M., G. Bergkamp y J. Scanlon. 2003. Elementos esenciales de los caudales ambientales. San José, C.R: UICN-ORMA. pp. 125.

Evaluación de Ecosistemas del Milenio (EM). 2003. Ecosistemas y bienestar humano: Marco para la evaluación. Resumen. Informe del grupo de trabajo sobre Marco conceptual de la evaluación de ecosistemas del milenio, Secretaría de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio/World Resources Institute, pp. 20.

FAO. 1996. Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Number 130, Rome.

FAO. 2009. Pago por servicios ambientales en áreas protegidas en América Latina. 6 p.

Flores-Márquez, E. L., R. G. Martínez-Serrano, R. E. Chávez, Y. Crusillo, G. Jiménez y O. Campos-Enriquez. 2008. Numerical modeling of Etna Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios. *Geofísica Internacional* 47 (1), 27-40.

Fundación Gonzalo Río Arronte I. A. P. (FGRA). <http://www.fgra.org.mx/agua>. Consultado el 31 de julio de 2015.

García, E. 1998. Climas (clasificación de Köppen modificado por García). Escala 1:1000,000 Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no. Consultado el 28 de febrero de 2015.

Garrido, A., M.L. Cuevas, H. Cotler, C. Enríquez, A. Díaz. 2006. Memorias del Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Tema 5: Monitoreo e indicadores para cuencas y microcuencas. <http://www.inecc.gob.mx/cuencas-eventos/433-cuencas-con-nal-tema5>. Estimación de la afectación potencial al caudal ecológico y la condición ambiental de los ríos de México: un modelo de análisis geográficos. Fecha de consulta: 1 de junio de 2015.

Garrido, A., Enríquez, C., Luna, N., Sánchez, O. y Pérez, JL. (2008). Delimitación de las Zonas Altimétricas de las Cuencas Hidrográficas del territorio continental

Mexicano. Obra cartográfica con escala fuente 1:250,000. Conjunto de datos vectoriales. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México.

Garrido, A., M. L. Cuevas, H. Cotler, D. I. González y R. Tharme. 2010. Evaluación del grado de alteración ecohidrológica de los ríos y corrientes superficiales de México. *Investigación Ambiental*, 2(1), 25–46.

Gómez-Balandra M. A. y M.P. Saldaña-Fabela. 2012. Alcances y Aplicaciones de la Norma de Caudal Ecológico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México, noviembre 2012.

Gómez-Balandra, M. A., A. Ordoñez Ferrusco, M. A. Mijangos Carro y S. Rodríguez Torres. 2013a. Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático y al riesgo ecológico. Congreso IMTA 2013, pp. 15-21.

Gómez-Balandra, M. A., S. Rodríguez Torres y P. Saldaña Fabela. 2013b. Análisis comparativo de los métodos hidrológicos aplicados en la norma de caudal ecológico. Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Morelia, 2013, pp. 171-184.

González-Mora, I. D., G. de la Lanza-Espino y R. Sánchez- Navarro. 2009. Memoria del Taller: propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco. Manejo del agua en cuencas hidrográficas: desarrollo de nuevos modelos en México. Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. México, D.F. 19 p. DOI:10.13140/RG.2.1.2173.9041.

- González-Villela. 2013. Aproximación holística para el manejo integrado de las cuencas y el caudal ecológico: estudio de caso. Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Morelia, 2013, I207-I216.
- González, P., M.A. Briones, Alfaro. 2004. Integración del conocimiento faunístico de Estado. En: García, A., Ordoñez, M., M., Briones (ed.). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund. México. 605 pp.
- Grecco-Gélvez, A. y L. F. Salazar-Velásquez. 2012. Metodología para la determinación de los caudales de Garantía Ambiental. Empresas Públicas de Medellín E. S. P. Planeación General. Medellín. Diciembre de 2012.
- Hernández-Hernández. 2011. La construcción social de acuerdos: proyectos de desarrollo, actores sociales y negociación. El caso de la posible construcción de una hidroeléctrica en Paso de la Reina, Oaxaca 2006-2010. Centro de investigaciones y estudios superiores en antropología social (CIESAS). Tesis para optar al grado de Maestro en antropología social. México D.F.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2005. Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México. SEMARNAT. México.
- Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI). 2005. II Censo de población y vivienda. México.

Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI). 2005. Guía para la interpretación de cartografía geológica. México. 26 pp.

Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI). 2007. Conjunto de datos vectoriales edafológicos, serie II escala 1:250,000. México.

Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI). 2010a. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000:serie IV. México.

Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI). 2010b. Demografía y Población <http://www3.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=17484> (enero 2013).

Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI). 2010c. Red hidrográfica , escala 1:250,000. México.

Jiménez, J.A., J. Cavo, F. Pizarro y E. González. 2005. Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: Determinación inicial para el Río Tempisque. UICN, Costa Rica 40 Pp.

King, J.M., R.E. Tharme y C.A. Brown. 1999. World Commission on Dams Thematic Report: definition and implementation of instream flows. World Commission on Dams: Cape Town.

Martínez, E., I. Villarejo y A. Fernández. 2004. Peces continentales. En: García, A., Ordoñez, M., M., Briones (eds.) Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología,

UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza-World WildlifeFund, México. 605 pp.

Martínez-Zepeda, L. M. 2012. Determinación de caudales ambientales para ríos de la cuenca del río San Juan (México) mediante la aplicación de métodos hidrológicos. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental.

Mackey Brendan. 2005. La integridad ecológica: Un compromiso hacia la vida en la Tierra. En: Corcoran y Peter Blaze. La Carta de la Tierra en Acción: Hacia un Mundo Sostenible. Editorial: KIT Publishers, Ámsterdam. En colaboración con la Iniciativa de la Carta de la Tierra, San José, Costa Rica. Pp . 67-71.

Naiman, R.J., S.E. Bunn, C.Nilsson, G.E. Petts, G. Pinay y L.C. Thompson. 2002. Legitimizing Fluvial Ecosystems as Users of Water: An Overview. Environmental Management Vol. 30, No. 4, pp.455-467.

Nilsson, C. y B. M. Renöfält. 2008. Linking flow regime and water quality in rivers: a challenger to adaptative catchment management. Ecology and Society 12 (2): 18.

Nilsson, C. y M. Svedmark, 2002. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. Environmental Management Vol. 30, No. 4, pp. 468-480.

Olivera Toro-Maya, A. M. 2013. Pronóstico de las afectaciones ambientales ocasionadas por la construcción de presas utilizando el cálculo de caudal ecológico. Tesis para obtener el grado de: maestro en ciencias en ingeniería ambiental. D.F., México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.

Palma-Raymundo, M. L. 2013. Determinación del caudal ecológico: impacto económico en el usuario agrícola de la cuenca Río Yautepec, estado de Morelos. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias. Puebla, Puebla.

Peralta, M., P. Vásquez, D. Alavez, R. Contreras, A. Santos, F. Palma, E. Martínez, R. Ramírez y E. Cruz. 2011. Caracterización del programa de ordenamiento ecológico regional del territorio del estado de Oaxaca. Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 268 pp.

Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain; J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks, J.C. Stromberg. 1997. The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* Vol. 47 No. 11.

Poff, N.L., B.D. Richter, A.H. Arthington, S.E. Bunn, R.J. Naiman, E. Kendy, M. Acreman. 2009. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*.

Postel, S. y B. Richter. 2003. Rivers for life. Managing water for people and nature. Island Press, EE.UU 253 p.

Restrepo-Vélez L. A. y Gómez-Sal A. 2008. Un marco conceptual y analítico para estimar la integridad ecológica a escala de paisaje. ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura CLX X XIV 729 enero-febrero 31-44 ISSN: 0210-1963.

Richter, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell y D.P. Braun. 1996. A method for assessing hydrologic alteration with ecosystems. Conservation Biology 10 (4): 1163-1174.

Rodríguez-Torres, S. 2012. Caracterización ambiental y determinación de caudal ecológico en la cuenca del Río Verde, Oaxaca. Tesis que para obtener el grado de: Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental-Agua. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Jiutepec, Morelos, México.

Rodríguez-Torres, S. y M. A. Gómez-Balandra. 2013. Caracterización del régimen de caudal natural para la asignación del agua en la cuenca del río Verde, Oaxaca, México. Revista Aqua-LAC, Vol. 5, N° 1, Mar. 2013. Pp.74-87.

Salinas-Rodríguez S. A. y N. Ramírez-Marcial. 2010. Ríos de la reserva de la biosfera El Triunfo, un diagnóstico para su restauración ecológica. Hidrobiológica 20(2): 91-10.

Sánchez, I., M. A. Almendarez, M.V. Morales y C.A Salinas. 2012. Valor de existencia del servicio ecosistémico hidrológico en la Reserva de la Biósfera Sierra La

Laguna, Baja California Sur, México. Frontera Norte, Vol. 25, Núm. 50. Julio-Diciembre de 2013, Pp. 97-129.

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 (comp.), *Ambiente, Biología, Sociedad, Manejo y Legislación de la Zona Costera Mexicana* (primera edición, pp. 358-386). México.

Santacruz de León, G. y M. Aguilar Robledo. 2009. Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica* Vol. 19, No. 1, México. Pp. 25-32.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2006. Listado de áreas destinadas voluntariamente a la conservación. Consultado el 31 de julio de 2015 http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/areas_certi.php.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Listado de áreas destinadas voluntariamente a la conservación. Consultado el 31 de julio de 2015 http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/areas_certi.php.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2010. Listado de áreas

destinadas voluntariamente a la conservación. Consultado el 31 de julio de 2015
http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/areas_certi.php.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Listado de áreas destinadas voluntariamente a la conservación. Consultado el 31 de julio de 2015
http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/areas_certi.php.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2013. Estadísticas del agua. Capítulo 2 Situación de los recursos hídricos. México.

Strange E.M., K.D. Fausch y A.P. Covich. 1999. Sustaining Ecosystem Services in Human-Dominated Watersheds: Biohydrology and Ecosystem Processes in the South Platte River Basin. *Environmental Management* Vol. 24, No. 1, pp.39-54.

Tennant, D. 1976. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and related Environmental Resources. *Procs. on Instream Flow Needs Symp.* 326-327.

Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6), 397–441.

TNC (The Nature Conservancy). 2009. Manual de usuario de Indicadores de alteración hidrológica, Versión 7.1. Nature.

Vidal-Zepeda, R. 1990. Precipitación media anual, 1:4000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México.

Villarreal-Hernández, D. R. 2011. Estimación del escurrimiento hídrico debido al cambio de uso del suelo en la subcuenca Atoyac del estado de Oaxaca a través de un sig. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR). Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Oaxaca, México.

Villareal-Hernández, D. R., Belmonte Jiménez S. I. y Ladrón de Guevara M. 2011. Evaluación del cambio de uso de suelo en la cuenca del río Atoyac de Oaxaca, a través de un SIG. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR_Oaxaca). Instituto Politécnico Nacional. 5p.