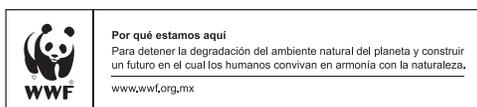




El Proyecto Mixteca fue creado por iniciativa y gestión de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) ante el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), a través del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en coordinación con el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

De este modo, el Proyecto Mixteca es el resultado del trabajo conjunto de varias instituciones que logra sus objetivos con la participación y decisión de las comunidades, el apoyo de las instancias de investigación y las organizaciones de la sociedad civil, así como con el respaldo de los tres niveles de gobierno.





Proyecto financiado por el

FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL
INVERTIMOS EN NUESTRO PLANETA



MANTENIENDO
LOS BENEFICIOS
QUE NOS OFRECE
LA NATURALEZA



DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO MIXTECO, MÉXICO

Dra. Yuki Hueda Tanabe



Proyecto financiado por el

FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL
INVERTIMOS EN NUESTRO PLANETA

El Proyecto Mixteca fue creado por iniciativa y gestión de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) ante el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), a través del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en coordinación con el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Comisión Nacional Forestal (Conafor), y la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

De este modo, el Proyecto Mixteca es el resultado del trabajo conjunto de varias instituciones que logra sus objetivos con la participación y decisión de las comunidades, el apoyo de las instancias de investigación y las organizaciones de la sociedad civil, así como con el respaldo de los tres niveles de gobierno.

Tabla de contenido

Índice de figuras.....	2
Índice de tablas.....	3
Caudal ecológico en la Cuenca del Río Mixteco, México.....	4
Introducción.....	4
Caudal ecológico.....	7
Programa nacional de reservas de agua.....	7
Determinación del caudal ecológico de la Cuenca del Río Mixteco.....	8
Objetivo ambiental.....	10
Caudal ecológico por valores de referencia.....	11
Regímenes hidrológicos natural - alterado	13
Análisis hidrológico detallado.....	15
Régimen de avenidas.....	17
Tasa de cambio	20
Volumen final de reserva	22
Discusión.....	23
Consideraciones finales.....	24
Bibliografía.....	25

Índice de figuras

Figura 1. La Cuenca del Río Mixteco.	4
Figura 2. Gasto diario (1953-1967 y 1979-2003, 39 años en total) de la estación de aforo El Fraile (18434), representado en escala logarítmica.	9
Figura 3. Curvas de flujo para cada año.	9
Figura 4. Análisis de percentiles del EMM del Río Mixteco. Debido a que el percentil es mayor al 10% del EMM, se determinó que es una corriente de agua perenne.	11
Figura 5. Caudal ecológico (Qec) mediante valores de referencia para la Cuenca del Río Mixteco, representación en escala logarítmica.	13
Figura 6. Comparación mensual entre el régimen hidrológico natural y el régimen hidrológico alterado, representación en escala logarítmica.	14
Figura 7. Comparación anual entre el régimen hidrológico natural y el régimen hidrológico alterado, representación en escala logarítmica.	14
Figura 8. Régimen del caudales ordinarios para años con diferentes condiciones hidrológicas, representación en escala logarítmica.	16
Figura 10. Distribuciones estadísticas para identificar la magnitud de las avenidas tipo a distintos periodos de retorno.	17
Figura 11. Caudales diarios identificados entre los umbrales de cada categoría de avenidas, donde categoría I - Avenida con periodo de retorno de 1 año; categoría II - avenida con periodo de retorno de 1.5 años; categoría III- Avenida con periodo de retorno de 5 años.	18
Figura 12. Tasas de cambio ascendente y descendente de los caudales diarios por eventos de avenidas (1953-2003).	21



Índice de tablas

Tabla 1. Objetivo ambiental de la Cuenca del Río Mixteco.....	10
Tabla 2. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales.	11
Tabla 3. Caudal ecológico (Qec) mediante valores de referencia para la cuenca del Río Mixteco.	12
Tabla 4. Resumen de comparación entre los regímenes mensuales y anuales.	14
Tabla 5. Criterios para la elección el régimen de caudales ordinarios estacionales para años con diferentes condiciones hidrológicas.....	15
Tabla 6. Determinación del régimen de caudales ecológicos ordinarios estacionales para cada condición hidrológica (húmeda, media, seca y muy seca).....	15
Tabla 7. Criterios para la integración de los caudales ordinarios a partir de las frecuencias de ocurrencia de distintas condiciones hidrológicas para los objetivos ambientales.	16
Tabla 8. Determinación del volumen anual de reserva a partir de los caudales ordinarios.	17
Tabla 9. Identificación de la magnitud de las avenidas utilizando los caudales máximos anuales de la serie histórica.....	18
Tabla 10. Duración y número de eventos consecutivos para cada categoría de avenida.	19
Tabla 11. Momento de ocurrencia de cada categoría de avenida.....	20
Tabla 12. Criterios de integración de las avenidas tipo a partir de sus frecuencias de ocurrencia según objetivos ambientales.....	21
Tabla 13. Régimen de avenidas y el volumen anual que representa conforme a un objetivo ambiental D.	22
Tabla 14. Volumen final de reserva, objetivo ambiental D.	22
Tabla 15. Volumen final de reserva, objetivo ambiental C.	23

Caudal ecológico en la Cuenca del Río Mixteco, México

Introducción

La Cuenca del Río Mixteco, en la región hidrológica 18 - Balsas, comprende desde el nacimiento del Río Mixteco, en la vertiente occidental de la sierra oaxaqueña, hasta la estación hidrométrica El Fraile; tiene una superficie de aportación de 11,094.64 kilómetros cuadrados. Pertenece a la Cuenca del Río Atoyac y está delimitada al Norte por la cuenca hidrológica Río Bajo Atoyac; al Sur por la Región Hidrológica número 20 Costa Chica de Guerrero; al Oeste por las cuencas hidrológicas Río Bajo Atoyac y Río Tlapaneco; y al Este por la Región Hidrológica 28 - Papaloapan (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México), 2011a) (Figura 1).

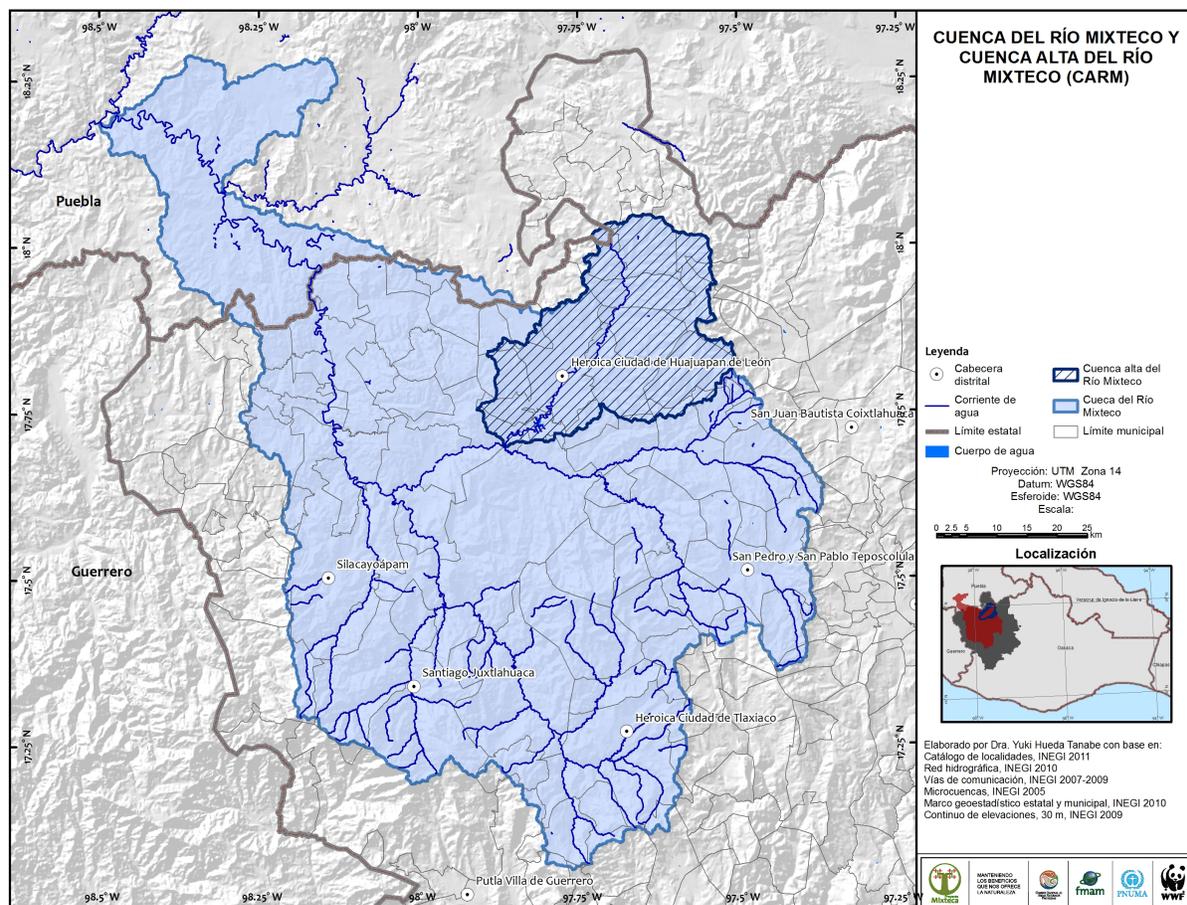


Figura 1. La Cuenca del Río Mixteco.



La Cuenca del Río Mixteco sufre procesos de degradación que amenazan los recursos naturales de la región y por lo tanto los medios de vida sostenibles de sus habitantes. La degradación es debida a su historia geológica-tectónica-climática y a factores antropogénicos (Kirkby, 1972; Spores, 2007; Kowalewski, Balkansky *et al.*, 2009; Fernández Reynoso, 2012).

Las actividades humanas desde tiempos precolombinos han causado la degradación del medio ambiente y la reducción de la vegetación en las laderas. La presión demográfica en tiempos prehispánicos hizo necesaria la utilización de todas las tierras no ocupadas por los asentamientos humanos. Los mixtecos buscaron tecnologías agrícolas alternativas para aumentar la productividad agrícola construyendo un sistema de muros o terrazas y de esta manera aprovechar lugares considerados como no aptos para la agricultura. “En la Mixteca Alta, los humanos fueron un factor determinante en la ecuación. Continuamente desde el origen de las aldeas sedentarias, la acción del hombre modificó el paisaje. La gente hizo aclareos de los pastizales y de los bosques causando la pérdida rápida del suelo, debido a que los mejores suelos eran los más susceptibles de erosionarse” (Kowalewski, Balkansky *et al.*, 2009:6). De acuerdo con Spores (1969), los agricultores causaron deliberadamente la erosión moviendo suelo de la parte alta de las laderas para incrementar la deposición de sedimentos en terrazas construidas. Conocidas como lama-bordo, estas terrazas fueron esencialmente construidas en cañadas donde la erosión de las laderas adyacentes continuamente llenaban las terrazas con nuevo suelo. Estas construcciones en los drenajes requerían poco mantenimiento y fueron una buena alternativa para la agricultura intensiva junto con el cultivo en los valles (Kowalewski, Feinman *et al.*, 2006:203).

Durante la Colonia, en la Mixteca Alta se indujo la siembra del trigo, la grana cochinilla y la cría de ganado menor con tal intensidad que pronto se introdujo también en la Baja y Costa, ésta tuvo consecuencias negativas para la Mixteca Baja, región con una economía basada en la hacienda agrícola ganadera aún más redituable que la tributación (Takahashi, 1981). El decrecimiento de la población condujo al abandono de las terrazas de cultivo para convertirlas en áreas de pastoreo (Kirkby, 1972), el ganado menor se adaptaba a las condiciones del terreno y podía aprovechar superficies no aptas para el cultivo (Pastor, 1987:140). De acuerdo con Romero Frizzi (1990), "anualmente miles de cabezas de ganado, al igual que en otras regiones de la Nueva España,



iniciaban su largo peregrinar desde sus estancias a sus agostaderos de invierno. La trashumancia, entre las tierras altas de los alrededores de Teposcolula, del árido Valle de Coixtlahuaca o de los terrenos de Tlaxiaco, hacia los más fértiles lugares que de Chalcatongo hacia el sur descendían mirando al Pacífico, se convirtió en una característica inseparable de la hacienda de ganado menor" (Romero Frizzi, 1990:330). "Cinco siglos de pastoreo del ganado han agotado los pastos y contribuye a la erosión incontrolada" (Kowalewski, Balkansky *et al.*, 2009:9).

El sedimento volcánico (cenizas), las condiciones climáticas que favorecen la erosión química de las rocas ígneas, la presencia de fases líticas a profundidades menores de un metro y pendientes medias del 40%, son condiciones que favorecen la escorrentía subsuperficial causando desarrollo cárcavas en pendientes a partir del 5%. Además, alto coeficiente de escorrentía, más del 20%, hace que la escasez de agua y la formación de cárcavas de erosión. Por otra parte, la cuenca del río Mixteco tiene una producción de sedimentos de 17.04 ton/ha/año que hace de esta región una de las tasas de degradación más altas del país (Fernández Reynoso, 2012).

En la región, los programas de desarrollo no han tenido un impacto significativo por lo antes expuesto, y además porque procesos geomorfológicos que conforman el paisaje de la Mixteca no han sido diagnosticados correctamente y no hay ninguna evaluación de impacto ambiental ni de caudales ecológicos.

Es necesario el desarrollo de un Sistema de Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Planificación Integrada de la Cuenca del Río Mixteco; el Proyecto Mixteca, junto con socios y aliados está trabajando para proponer un plan de manejo sostenible para la cuenca que incluya acciones para la gestión de desechos, control de la escorrentía superficial, reducción de la sedimentación del río, aumento de la cobertura forestal mediante la reforestación; y de esta manera mejorar la cantidad de y la calidad del agua, y conservar las especies endémicas de la cuenca; y de esta manera garantizar los servicios ecosistémicos que ésta provee.

Un río proporciona importantes bienes y servicios a la sociedad como resultado de procesos físicos, químicos y ecológicos a diversas escalas temporales, y están vinculados en forma directa con el comportamiento natural de las corrientes de agua y su grado de calidad. Este comportamiento o



variación de las corrientes de agua se expresa en el llamado caudal ecológico. El conocimiento del caudal ecológico permite generar información para conciliar y ordenar en forma participativa y sostenible la demanda económica, social y ambiental del agua en una cuenca hidrográfica (SEMARNAT et al., 2014).

Caudal ecológico

El caudal ecológico es un instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad (Fondo Mundial para la Naturaleza, 2010). Está basado en el principio de la condición natural del régimen hidrológico y el gradiente de la condición biológica, que tiene por objeto establecer un régimen para sostener a los ecosistemas, el uso del agua y las necesidades de almacenamiento a lo largo del año (Secretaría de Economía (México), 2012).

El trabajo desarrollado por la Alianza entre WWF y la Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. (FGRA) en colaboración con la Comisión Nacional del Agua (Conagua) en torno a los análisis de determinación del caudal ecológico en tres cuencas modelo, contó con la participación de los tres órdenes de gobierno, la academia y comunidades rurales, entre otros. Esta experiencia sirvió de base para la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que fue aprobada en septiembre de 2012 (Secretaría de Economía (México), 2012) que establece el procedimiento para la determinación de caudales ecológicos en las cuencas hidrográficas. La norma incluye los procedimientos y métodos para determinar el caudal ecológico.

Programa nacional de reservas de agua

CONAGUA lideró un proceso, junto con la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arrotne I.A.P. para identificar cuencas hidrológicas con gran riqueza biológica, disponibilidad de agua y baja presión de uso para establecer reservas de agua que garanticen los flujos para la protección ecológica, en los términos de la Ley de Aguas Nacionales (Presidencia de la República (México), 2011). Estas reservas garantizarían la funcionalidad del ciclo hidrológico y de los ecosistemas, el mantenimiento de los bienes y servicios ecosistémicos asociados, y la conservación de la biodiversidad.



“Este programa representa una acción temprana de adaptación [al cambio climático], enfocado en rescatar agua para el ambiente y las futuras generaciones, y coincide con la imperiosa necesidad de la sociedad de recuperar su patrimonio natural, mediante una gestión centrada en el ahorro y que garantice cuencas en equilibrio” (Fondo Mundial para la Naturaleza, 2012).

Determinación del caudal ecológico de la Cuenca del Río Mixteco

El Proyecto Mixteca determinó el caudal ecológico en el Río Mixteco teniendo en cuenta la importancia ecológica, el índice de extracción de agua, el estado de conservación deseado y el objetivo ambiental, y de esta manera establecer límites de extracción sostenibles con sentido ecológico.

“La evaluación del caudal ecológico trata de predecir qué clase de régimen del flujo será necesario alcanzar para cualquier estado ecológico determinado en un río”(O’Keeffe and Le Quesne, 2009:20).

Los cálculos se hicieron mediante la aproximación hidrológica establecida en la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 utilizando la metodología propuesta por la Alianza WWF - Fundación Gonzalo Río Arronte IAP (FGRA) en el Apéndice D de la Norma Mexicana NMX (Secretaría de Economía (México), 2012). El volumen de agua que debe garantizarse para el funcionamiento natural del ecosistema, se determinó con datos diarios históricos (1953-1967 y 1979-2003, 39 años en total) de la estación de aforo El Fraile (18434) (Figuras 2 y 3) (Comisión Nacional del Agua (México), 2010).

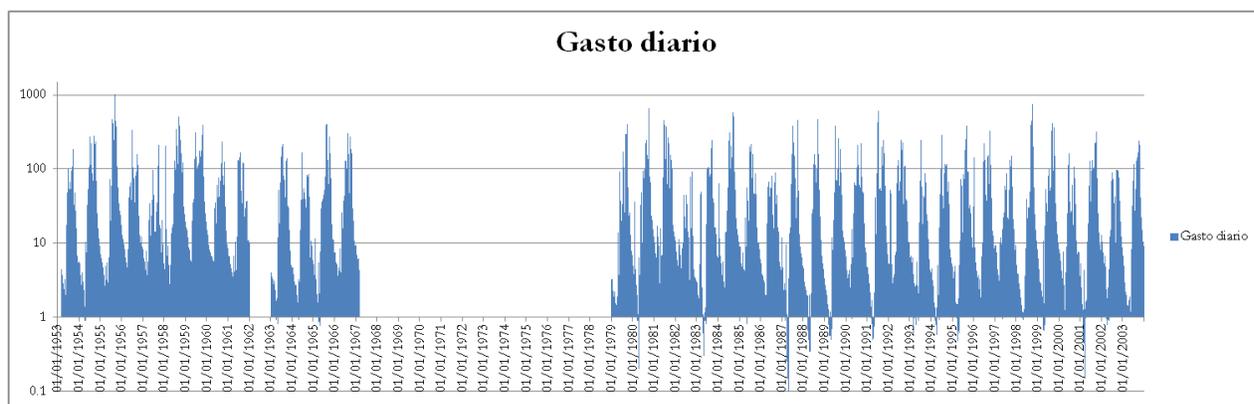


Figura 2. Gasto diario (1953-1967 y 1979-2003, 39 años en total) de la estación de aforo El Fraile (18434), representado en escala logarítmica.

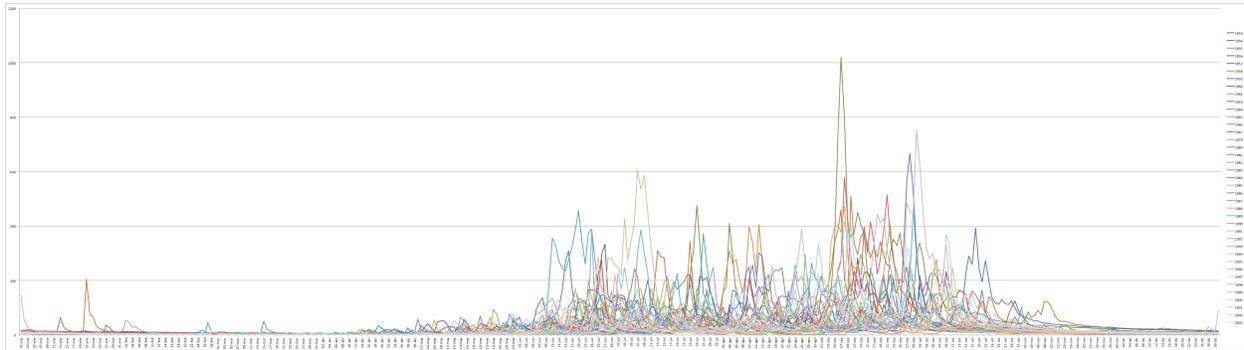


Figura 3. Curvas de flujo para cada año.

La propuesta de caudales ecológicos incluye un análisis sobre (Instituto de la Naturaleza y la Sociedad de Oaxaca (2014)):

- El nivel de planeación, en el que los resultados se obtienen a través de valores de referencia, definidos como porcentajes del escurrimiento medio anual (EMA), lo que significa que sólo se evalúa un volumen anual.
- El nivel de gestión mensual, mediante el análisis hidrológico detallado, en el que se analizan los escurrimientos en escenarios de años muy secos, secos, medios y húmedos.
- Para casos de alteración del régimen hidrológico ya sea por in infraestructura hidráulica o hidroeléctrica o por efectos de la gestión inadecuada, se definen los cinco componentes de las avenidas, tanto intraanuales como interanuales: magnitud, frecuencia, momento de ocurrencia, duración y tasa de cambio.

Con estos resultados se propone un balance de disponibilidad sustentable que privilegia la conservación de las fuentes de agua y la estructura natural del sistema hidrológico con todos sus servicios ecosistémicos, para beneficio de los habitantes de la cuenca.



Objetivo ambiental

Con base en el Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas, publicado en el Diario Oficial de la Federación en 26 de enero de 2011, en la cuenca del Río Mixteco el volumen medio anual del escurrimiento natural es de 874.3 millones de metros cúbicos y el volumen anual actual comprometido aguas abajo es de 1016.4 millones de metros cúbicos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México), 2011a). Es decir no hay disponibilidad de agua superficial ya que el volumen comprometido aguas abajo es mayor al escurrimiento medio anual, existe un déficit.

El primer paso fue identificar el objetivo ambiental, mediante el Apéndice A y la matriz en la Norma Mexicana (Secretaría de Economía (México), 2012), que se determina teniendo en cuenta el estado de conservación de la cuenca y el índice de explotación del agua. La Cuenca del Río Mixteco tiene un objetivo medioambiental D (Tabla 1); a pesar de que tiene una alta importancia ecológica, el índice de explotación del agua es muy alto.

Tabla 1. Objetivo ambiental de la Cuenca del Río Mixteco.

Clave de región hidrológica	Nombre de región hidrológica	Nombre de cuenca con estudio de disponibilidad	Importancia ecológica	Presión de uso	Estado de conservación deseado	Objetivo ambiental
18	Balsas	Río Mixteco	Alta	Muy alta	Deficiente	D

Posteriormente se determinó si el Río Mixteco era una corriente perenne o intermitente con un análisis estadístico de percentiles de escurrimiento medio mensual (EMM) con el siguiente criterio (Figura 4):

- Percentil 0 > 10% del EMM = Corriente perenne
- Percentil 0 < 10% del EMM = Corriente temporal

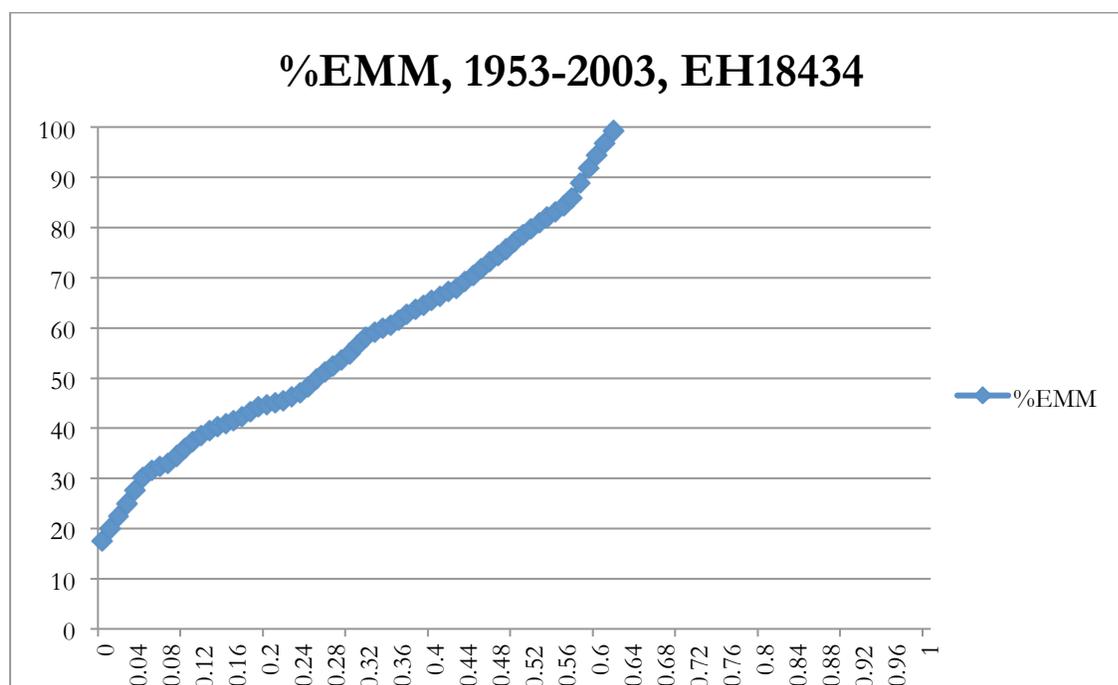


Figura 4. Análisis de percentiles del EMM del Río Mixteco.

Debido a que el percentil es mayor al 10% del EMM, se determinó que es una corriente de agua perenne.

Caudal ecológico por valores de referencia

En una primera aproximación es calcular el caudal ecológico por valores de referencia utilizando la tabla D.1 (Tabla 2) de la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012.

Tabla 2. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales.

Objetivo ambiental	Estado de conservación	Caudal ecológico	
		Corrientes perennes	Corrientes
A	Muy bueno	≥ 40	≥ 20
B	Bueno	25 - 39	15 - 19
C	Moderado	15 - 24	10 - 14
D	Deficiente	5 - 14	5 - 9



Dado que el Río Mixteco es una corriente perenne y tiene un objetivo ambiental D, se escogió como caudal ecológico Qec el 12% del escurrimiento medio anual (EMA). La tabla 3 y la figura 5 muestran los umbrales y el caudal seleccionado.

Tabla 3. Caudal ecológico (Qec) mediante valores de referencia para la cuenca del Río Mixteco.

Año/mes	Promedio (m ³ *s ⁻¹)	Deficiente		Moderado		Bueno		Muy bueno		Qec Elegido
		5%	14%	15%	24%	25%	39%	40%	60%	
	CMM	5%	14%	15%	24%	25%	39%	40%	60%	12%
Ene	180.60	19.12	25.28	27.09	43.34	45.15	70.43	72.24	108.36	21.67
Feb	108.64	19.12	19.12	19.12	26.07	27.16	42.37	43.46	65.18	19.12
Mar	83.22	19.12	19.12	19.12	19.97	20.80	32.45	33.29	49.93	19.12
Abr	85.82	19.12	19.12	19.12	20.60	21.46	33.47	34.33	51.49	19.12
May	269.90	19.12	37.79	40.49	64.78	67.48	105.26	107.96	161.94	32.39
Jun	1176.72	58.84	164.74	176.51	282.41	294.18	458.92	470.69	706.03	141.21
Jul	1644.57	82.23	230.24	246.69	394.70	411.14	641.38	657.83	986.74	197.35
Ago	1637.13	81.86	229.20	245.57	392.91	409.28	638.48	654.85	982.28	196.46
Sep	2660.27	133.01	372.44	399.04	638.46	665.07	1037.51	1064.11	1596.16	319.23
Oct	1496.54	74.83	209.52	224.48	359.17	374.13	583.65	598.62	897.92	179.58
Nov	437.70	21.89	61.28	65.66	105.05	109.43	170.70	175.08	262.62	52.52
Dic	245.21	19.12	34.33	36.78	58.85	61.30	95.63	98.08	147.12	29.42
Total	10026.31	567.37	1,422.17	1,519.66	2,406.32	2,506.58	3,910.26	4,010.53	6,015.79	1,227.20
Anual (Hm³*año- 1)	866.27	49.02	122.88	131.30	207.91	216.57	337.85	346.51	519.76	106.03

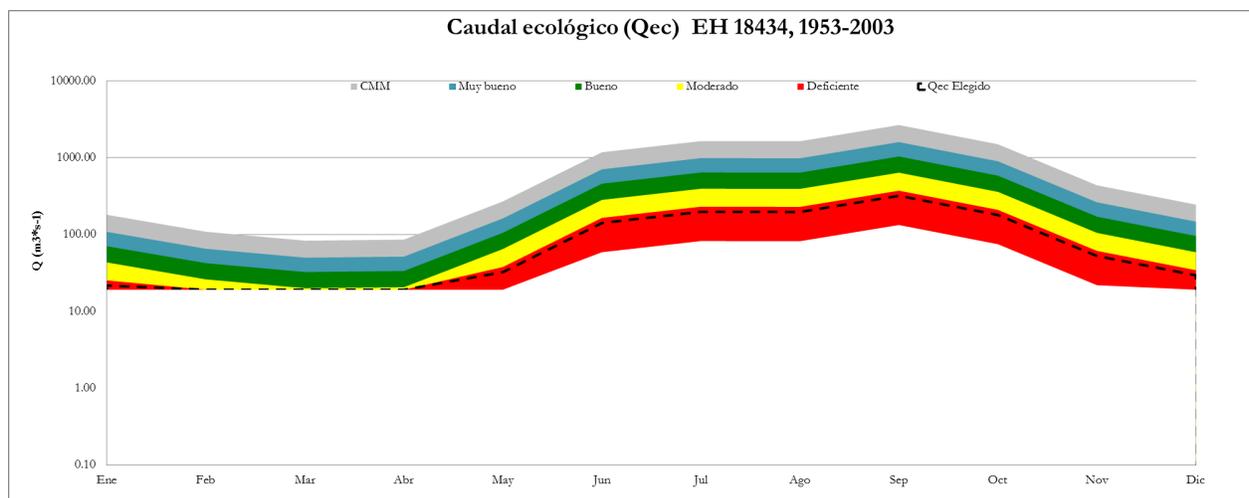


Figura 5. Caudal ecológico (Qec) mediante valores de referencia para la Cuenca del Río Mixteco, representación en escala logarítmica.

Regímenes hidrológicos natural - alterado

Para conocer si hubo o no alteración hidrológica se emplearon los criterios establecidos en el apéndice B de la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012:

- Se considera que no hay alteración si el régimen actual (RHA) cumple en magnitud mensual y anual más de un 50 % con relación al RHN;
- se considera que hay alteración si el cumplimiento del régimen actual (RHA) es < 50 % en su magnitud mensual y anual con relación al RHN.

Se consideró el periodo entre 1953 y 1967 como el régimen natural (RHN) y el segundo periodo entre 1979-2003) como el régimen alterado (RHA). La tabla 4 y las figuras 6 y 7 muestran los resultados y se concluye que el Río Mixteco no presenta alteración. Los valores promedio que corresponden al RHA (línea punteada) de distribuyen, en los meses y en los años, dentro de los límites de los percentiles 10 y 90 del RHN.



Tabla 4. Resumen de comparación entre los regímenes mensuales y anuales.

RHA	%	Conclusión
Mensual	68%	No hay alteración
Anual	76%	No hay alteración

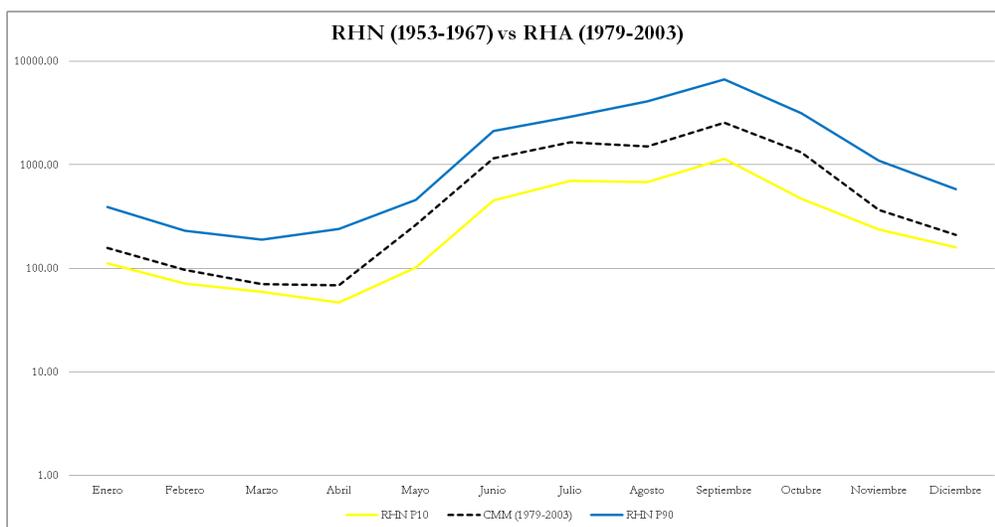


Figura 6. Comparación mensual entre el régimen hidrológico natural y el régimen hidrológico alterado, representación en escala logarítmica.

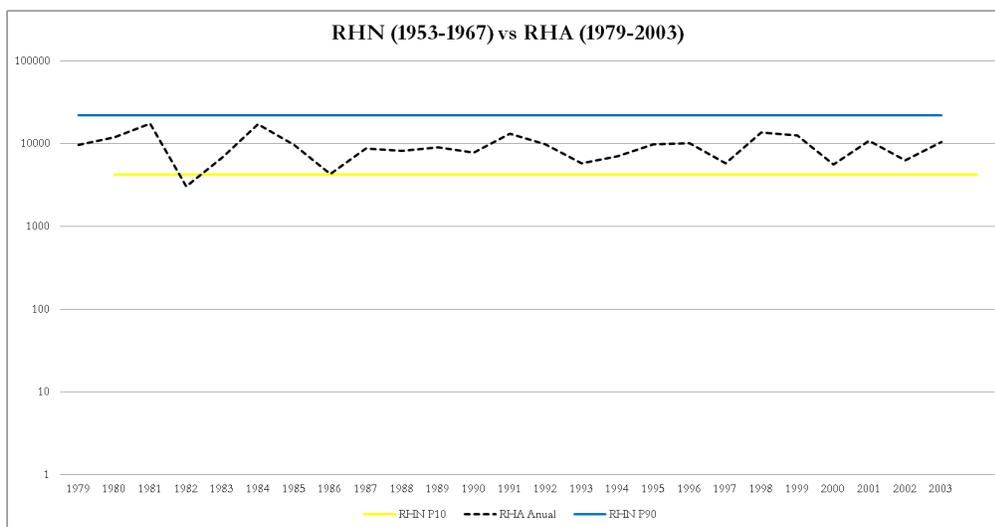


Figura 7. Comparación anual entre el régimen hidrológico natural y el régimen hidrológico alterado, representación en escala logarítmica.



Análisis hidrológico detallado

Para realizar este análisis se tomaron los criterios de la tabla D.2 de la norma (Tabla 5).

Tabla 5. Criterios para la elección el régimen de caudales ordinarios estacionales para años con diferentes condiciones hidrológicas.

Condiciones hidrológicas	Percentiles
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años húmedos	75
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años medios	25
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años secos	10
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años muy secos	0

Los resultados se muestran en la Tabla 6 y la Figura 8.

Tabla 6. Determinación del régimen de caudales ecológicos ordinarios estacionales para cada condición hidrológica (húmeda, media, seca y muy seca).

Mes/Tipo año	Muy seco		Seco		Medio		Húmedo	
	m ³ *s-1	Hm ³ *mes-1						
Ene	0.00	0.00	75.58	6.53	109.89	9.49	198.67	17.16
Feb	0.00	0.00	48.57	4.20	65.82	5.69	127.58	11.02
Mar	26.29	2.27	33.63	2.91	46.58	4.02	104.91	9.06
Abr	19.12	1.65	30.02	2.59	39.04	3.37	108.10	9.34
May	31.85	2.75	55.15	4.76	124.69	10.77	419.13	36.21
Jun	213.28	18.43	354.51	30.63	520.86	45.00	1505.63	130.09
Jul	336.19	29.05	583.48	50.41	762.56	65.88	2171.59	187.63
Ago	114.50	9.89	530.66	45.85	772.90	66.78	2326.68	201.02
Sep	388.10	33.53	1101.86	95.20	1268.64	109.61	3240.70	280.00
Oct	418.12	36.13	460.19	39.76	690.35	59.65	2095.38	181.04
Nov	108.57	9.38	197.45	17.06	265.41	22.93	556.25	48.06
Dic	90.62	7.83	119.28	10.31	159.40	13.77	281.17	24.29
Total	1746.64	150.91	3590.37	310.21	4826.12	416.98	13135.77	1134.93

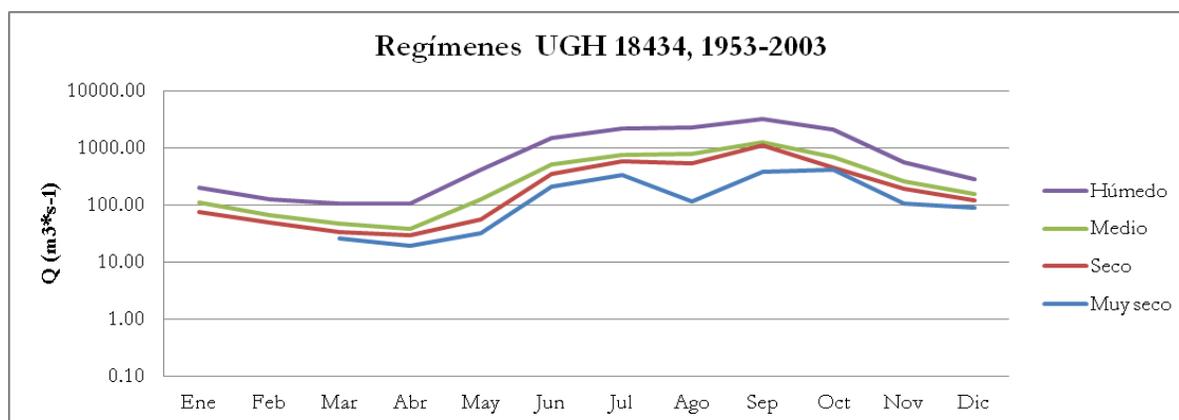


Figura 8. Régimen del caudales ordinarios para años con diferentes condiciones hidrológicas, representación en escala logarítmica.

Finalmente, la integración de los caudales ordinarios a partir de las frecuencias de ocurrencia de distintas condiciones hidrológicas se hizo utilizando la tabla D.3 de la norma (Tabla 7):

Tabla 7. Criterios para la integración de los caudales ordinarios a partir de las frecuencias de ocurrencia de distintas condiciones hidrológicas para los objetivos ambientales.

Objetivo ambiental	Frecuencia de ocurrencia de los regímenes de caudales ordinarios estacionales			
	Húmedo	Medio	Seco	Muy seco
A	0.1	0.4	0.3	0.2
B	0.0	0.2	0.4	0.4
C	0.0	0.0	0.4	0.6
D	0.0	0.0	0.0	1.0

Los resultados del análisis hidrológico detallado se muestran en la tabla 8; donde se determina el volumen anual de reserva con finalidad ambiental en la cuenca del Río Mixteco.



Tabla 8. Determinación del volumen anual de reserva a partir de los caudales ordinarios.

	Muy seco	Seco	Medio	Húmedo
Volumen del régimen de caudal base (VCoe - Hm ³ /año) para cada condición	150.91	310.21	416.98	1134.93
% EMA	17.41%	35.78%	48.10%	130.91%
Frecuencia de ocurrencia (fCoe)	1.00	0.00	0.00	0.00
Volumen para efecto del balance de disponibilidad (VtCoe - Hm³/año)	150.91	Porcentaje del escurrimiento medio anual		17.41%

Régimen de avenidas

Se tipificó y se caracterizó el régimen de avenidas. Se identificaron los tipos de avenidas necesarias para mantener a largo plazo los ecosistemas y describir sus características básicas (magnitud, frecuencia, duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio), considerando al menos tres categorías de avenidas (intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de media magnitud). Los resultados se muestran en la Tabla 9 y en las Figuras 10 y 11.

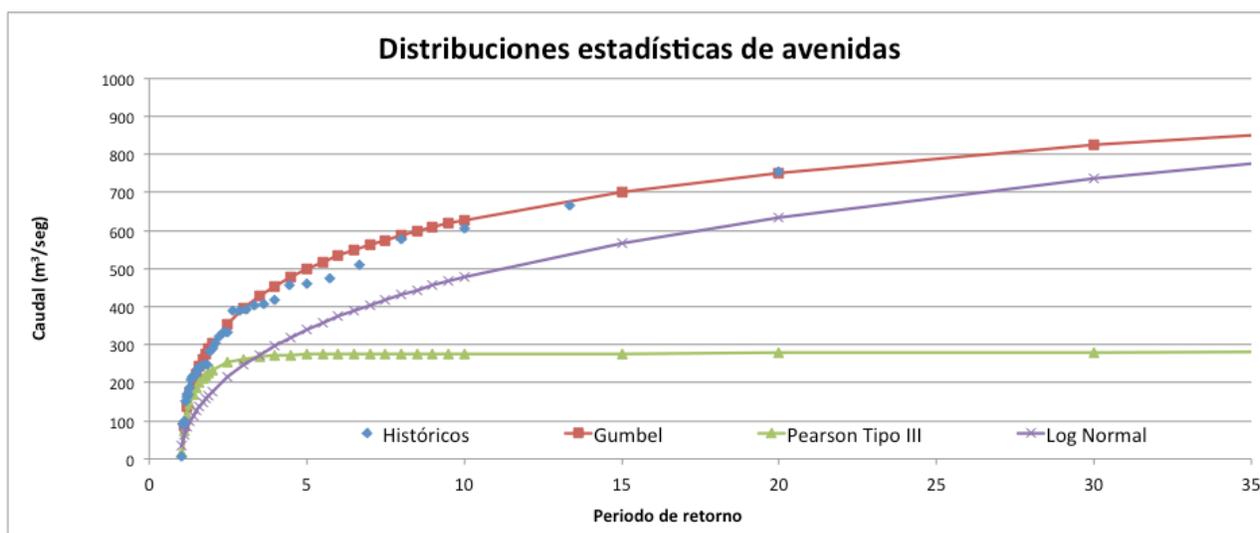


Figura 10. Distribuciones estadísticas para identificar la magnitud de las avenidas tipo a distintos periodos de retorno.

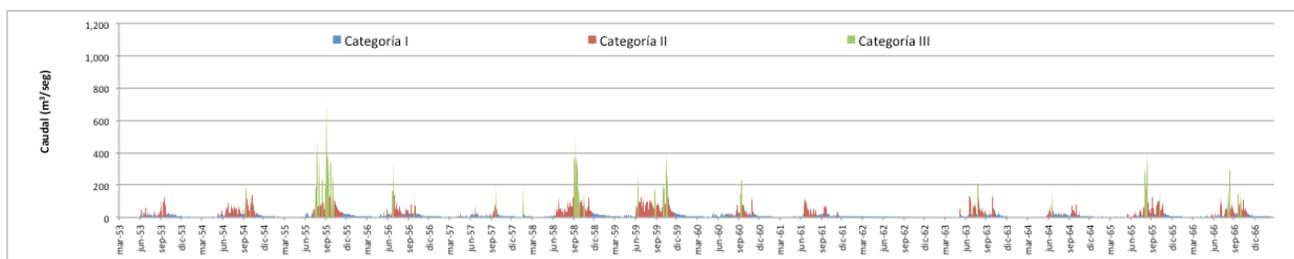


Figura 11. Caudales diarios identificados entre los umbrales de cada categoría de avenidas, donde categoría I - Avenida con periodo de retorno de 1 año; categoría II - avenida con periodo de retorno de 1.5 años; categoría III- Avenida con periodo de retorno de 5 años.

Tabla 9. Identificación de la magnitud de las avenidas utilizando los caudales máximos anuales de la serie histórica.

m ³ /s		Históricos	Distribución estadística			Criterios	
			GUMBEL	LOG III	LOG NORMAL	Promedio	Valor seleccionado
Periodo de retorno	1	34.4		15.9	35.6	28.6	30.0
	1.5	22.4	223.1	186.2	125.5	139.3	140.0
	2	120.1	302.7	233.8	175.4	208.0	
	5	310.4	498.5	275.1	338.9	355.7	360.0
	10	336.5	628.2	277.2	478.4	430.1	
	20	500.3	752.5	278.0	635.8	541.7	

Se realizó un ajuste utilizando diferentes distribuciones estadísticas (p.e. Gumbel Tipo I, Log Pearson Tipo III, Log Normal), mediante la obtención del promedio de la magnitud de las avenidas para los periodos de retorno considerados. Para el valor seleccionado se tomó el múltiplo de 5 que sigue al valor promedio.

Para determinar la duración de las avenidas, se contabilizó el número de días seguidos con valor por encima de sus correspondientes umbrales (30.00 m³/s, 140.00 m³/s, 360.00 m³/s) Tabla 10.



Tabla 10. Duración y número de eventos consecutivos para cada categoría de avenida.

DURACIÓN	Categoría I		Categoría II		Categoría III	
	No. de eventos	%	No. de eventos	%	No. de eventos	%
1	123	32.37	45	33.33	21	65.63
2	48	12.63	32	23.70	5	15.63
3	38	10.00	14	10.37	2	6.25
4	36	9.47	11	8.15	1	3.13
5	17	4.47	10	7.41	1	3.13
6	9	2.37	5	3.70	1	3.13
7	8	2.11	3	2.22	0	0.00
> 7	101	26.58	15	11.11	1	3.13
Total	380	100.00	135	100.00	32	100.00

Para conocer el momento de ocurrencia se contabilizó para cada categoría los meses en los que se producen, como se muestra en la Tabla 11.



Tabla 11. Momento de ocurrencia de cada categoría de avenida

MOMENTO	Categoría I		Categoría II		Categoría III		Todas las	
	No. de eventos	%	No. de eventos	%	No. de eventos	%	No. de eventos	%
ENE	9	0.28	2	0.41	0	0.00	11	0.29
FEB	4	0.12	0	0.00	0	0.00	4	0.10
MAR	1	0.03	0	0.00	0	0.00	1	0.03
ABR	1	0.03	0	0.00	0	0.00	1	0.03
MAY	64	1.96	0	0.00	0	0.00	64	1.68
JUN	421	12.89	46	9.35	5	8.20	472	12.36
JUL	624	19.11	80	16.26	9	14.75	713	18.67
AGO	647	19.82	83	16.87	4	6.56	734	19.22
SEP	824	25.24	202	41.06	38	62.30	1064	27.87
OCT	580	17.76	79	16.06	5	8.20	664	17.39
NOV	89	2.73	0	0.00	0	0.00	89	2.33
DIC	1	0.03	0	0.00	0	0.00	1	0.03
SUMA	3265	100.00	492	100.00	61	100.0	3818	100.00

Tasa de cambio

Para adoptar una tasa de cambio representativa de los eventos de avenida, se seleccionó para los incrementos positivos el percentil 90, y para los incrementos negativos el percentil 10. En el caso del Río Mixteco, la tasa de ascenso en las avenidas se sitúa en 103.74% y la de descenso en 39.02% (Figura 12).

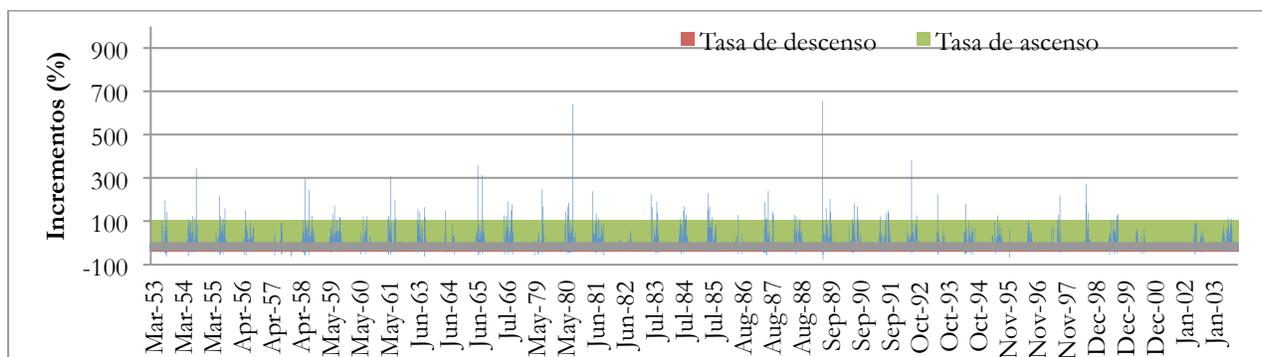


Figura 12. Tasas de cambio ascendente y descendente de los caudales diarios por eventos de avenidas (1953-2003).

Para el cálculo del volumen final de reserva o caudal ecológico se integró el análisis del régimen de avenidas y se tomaron en cuenta los criterios de integración a partir de la frecuencia de ocurrencia según objetivos ambientales establecidos en la Tabla D.4 de la norma (Tabla 12). Los resultados se muestran en la tabla 13.

Tabla 12. Criterios de integración de las avenidas tipo a partir de sus frecuencias de ocurrencia según objetivos ambientales.

Objetivo ambiental	Régimen de avenidas		
	Categoría I	Categoría II	Categoría III
A	10	6	2
B	5	3	2
C	3	2	1
D	2	1	1



Tabla 13. Régimen de avenidas y el volumen anual que representa conforme a un objetivo ambiental D.

Atributo del régimen hidrológico		Categoría I	Categoría II	Categoría III
Magnitud	m^3/seg	30	140	360
	$Hm^3/\text{día} (V_a)$	3	12	31
Frecuencia de ocurrencia (F_a)		2	1	1
Duración (no. de días - D_a)		8	4	2
Momento de ocurrencia		Jun-Oct		
Tasa de cambio (%)	Ascenso	103.74		
	Descenso	39.02		
$V_{t_{ra}}$ a 10 años		152.06		
$V_{t_{ra}}$ al año		15.21		

Volumen final de reserva

El volumen final de caudal ecológico en la Cuenca del Río Mixteco a efecto de integración al balance de disponibilidad de la cuenca se obtuvo a partir del volumen de caudales ordinarios y el régimen de avenidas como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Volumen final de reserva, objetivo ambiental D.

Volumen final de reserva (Vfr) anual

$$\begin{aligned}
 Vfr &= V_{t_{Coc}} + V_{t_{ra}} \\
 Vfr &= 150.91 + 15.21 \\
 Vfr &= 166.12 \quad Hm^3/\text{año} \\
 &= 19.16\% \text{ EMA}
 \end{aligned}$$



Discusión

El caudal ecológico no implica un uso consuntivo, el agua no dejaría de correr, y no se resta al usuario final; sólo estaría reservado para garantizar los servicios ecosistémicos en la cuenca. Por estas razones, y dada la alta importancia ecológica de la cuenca, proponemos considerar un objetivo ambiental C para el cálculo del caudal (tabla 15).

Tabla 15. Volumen final de reserva, objetivo ambiental C.

Volumen final de reserva (Vfr) anual			
Vfr =	V_t_{Coe}	+	V_t_{ra}
Vfr =	214.63	+	22.12
Vfr =	236.75		Hm³ / año
	27.31% EMA		

El volumen final de caudal ecológico en la cuenca del Río Mixteco sería entre el 19.16% (166.12 millones de metros cúbicos al año) y el 27.31% (236.75 millones de metros cúbicos al año) del escurrimiento medio anual. Esto representa entre el 16.34% y el 23.29% del volumen anual actual comprometido aguas abajo.

Desde 1940, existe una veda para el uso consuntivo de las aguas superficiales en la cuenca del Río Mixteco; el agua está comprometida para la generación de energía hidroeléctrica. A pesar de que el río está sobre-asignado, de acuerdo con el balance de disponibilidad, el agua sigue fluyendo, ya que la generación hidroeléctrica no es un uso consuntivo; por lo que esta veda y la consecuente prohibición de uso ha jugado en favor de la conservación del ecosistema: "Se declara de utilidad pública la protección, mejoramiento, conservación y restauración de las cuencas hidrográficas que conforman la Región Hidrológica número 18 Balsas, por lo que en esa región hidrológica se estableció una prohibición de explotación, o el uso de las aguas superficiales" (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México), 2011b). En marzo de 2011, se hizo una modificación a la veda y se decretó que una parte podría ser consumida para uso doméstico y urbano (aproximadamente 2.65% de la disponibilidad de agua superficial media anual) (Comisión Nacional del Agua (México), 2011;



Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México), 2011a, 2011b). Sólo una pequeña fracción de agua fue asignada, pero la demanda está creciendo y también lo hace la presión sobre el agua subterránea.

En este escenario, teniendo en cuenta que el agua sigue corriendo, se recomienda que se considere el caudal ecológico como un límite sustentable de uso del agua en favor del medio ambiente y de sustentabilidad de las fuentes naturales de agua, además se incluya como un parámetro en los balances hídricos de los estudios de disponibilidad. No se afectaría al usuario final, la Comisión Federal de Electricidad (CFE); al contrario, se garantiza que por lo menos, el volumen de reserva del caudal llegue al usuario final.

Consideraciones finales

El Proyecto Mixteca hizo una evaluación preliminar, pero fue un reto debido a la falta de datos históricos y de información sobre el río y las especies que viven allí. Para esta primera aproximación, el caudal ecológico se determinó mediante el estudio de los registros históricos de una estación hidrométrica, a la salida de la Cuenca del Río Mixteco, pero sería conveniente hacer una evaluación para cada afluente, especialmente el norte-oriental, donde está la presa Lázaro Cárdenas (conocida como Yosocuta) y donde procesos erosivos más graves están presentes.

Es necesario buscar un modelo de precipitación-escorrentía para simular los datos hidrométricos que hacen falta; llenar los vacíos de información y para tener una estimación científica sólida de caudal.

Por otra parte, se requieren recursos financieros para generar y recopilar información que integre, mediante el método holístico los conocimientos de especialistas en distintos campos (hidrológico, biológico y social) con el fin de entender los procesos y funciones del régimen hidrológico y discutir técnicamente cómo asociarlos con un caudal ecológico.

Asimismo, la conformación de un grupo técnico de trabajo, avalado por el Comité de Cuenca del Río Mixteco, es fundamental para propiciar un mejor vínculo entre los tomadores de decisiones, los



usuarios y el gobierno, con las instituciones educativas y de investigación. En ese grupo se deberán presentar los resultados del caudal ecológico, discutir la mejor forma de obtener los datos faltantes, analizar los datos, los balances, y los volúmenes de consumo, comprometidos y de reserva, e incorporar el manejo de agua.

Los ríos pueden ofrecer varios bienes y servicios ecosistémicos. Todo el mundo debe estar consciente de que la asignación de agua para el ecosistema sería beneficioso, pero los caudales ecológicos también implican que exista un equilibrio entre usos y usuarios; es necesario para lograr un consenso el uso del recurso hídrico.

La aprobación e implementación del caudal ecológico propuesto, requiere la participación y la apropiación del proceso por parte de los directamente involucrados. Todas las partes interesadas, los usuarios, el gobierno, los científicos y la sociedad, deben trabajar hacia obtener consensos sustanciales para destacar la necesidad de integrar la conservación de la biodiversidad en el uso de recursos naturales y la planificación del desarrollo en la región Mixteca de Oaxaca, mediante la integración de herramientas de los servicios ecosistémicos y los medios de vida sostenibles.

Esto se logrará a través de la implementación de los procesos de restauración de ecosistemas incluyendo la reforestación con plantas características de cada tipo de vegetación, la gestión de residuos sólidos, la reducción de la sedimentación y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas; la mejora y la aplicación de buenas prácticas para con el medio ambiente, a fin de mantener la productividad del suelo, contar con agua en cantidad suficiente y de calidad, así como conservar la biodiversidad en la región.

Bibliografía

Comisión Nacional del Agua (México) (2010, March 4, 2013). "Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)." from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada BANDAS.htm>.

Comisión Nacional del Agua (México) (2011). *Lineamientos y demás disposiciones a que se sujetará el aprovechamiento de las aguas nacionales para la Región Hidrológica número 18 Balsas*. México.



- Fernández Reynoso, D. S. (2012). *Priorización Hidrológica de las Principales Asociaciones Suelo-Vegetación Presentes en la Cuenca del Río Mixteco, Estado de Oaxaca*; Oaxaca.
- Fondo Mundial para la Naturaleza (2010). *Hoja informativa. Caudal ecológico, salud para el ambiente, agua para la gente*. México, WWF.
- Fondo Mundial para la Naturaleza (2012). *Hoja informativa. Programa de reservas de agua*. México, WWF.
- Instituto de la Naturaleza y la Sociedad de Oaxaca (2014). *Plan común para un bien común*. Oaxaca, México.
- Kirkby, M. (1972). *The physical environment of the Nochixtlan Valley, Oaxaca*. Nashville, Tenn., Vanderbilt University Press.
- Kowalewski, S. A., A. K. Balkansky, *et al.* (2009). *Origins of the Ñuu : archaeology in the Mixteca Alta, Mexico*. Boulder, Colorado, University Press of Colorado.
- Kowalewski, S. A., G. M. Feinman, *et al.* (2006). "Hilltowns and Valley Fields in Ancient Oaxaca". *Labor in cross-cultural perspective*. E. P. Durrenberger and J. E. Marti. Lanham, MD; Durham, N.H., AltaMira Press; Published in cooperation with the Society for Economic Anthropology: viii, 330 p.
- O'Keeffe, J. and T. Le Quesne (2009). *Keeping Rivers Alive. A primer on environmental flows*, WWF.
- Pastor, R. (1987). *Campesinos y reformas : la mixteca, 1700-1856*. México, D.F., Colegio de México, Centro de Estudios Históricos.
- Presidencia de la República (México) (2011). *Ley de Aguas Nacionales*. México, Diario Oficial: 20/06/2011.
- Romero Frizzi, M. d. I. A. (1990). *Economía y vida de los españoles en la Mixteca Alta, 1519-1720*. México, D.F., Instituto Nacional de Antropología e Historia : Gobierno del Estado de Oaxaca.
- Secretaría de Economía (México) (2012). *NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico*. México, Diario Oficial de la Federación: 20/09/2012.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México) (2011a). *Acuerdo por el cual se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas*. México, Diario Oficial: 26/01/2011.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México) (2011b). *Decreto por el que se modifican los diversos por los que se constituyen reservas de aguas nacionales y se establece en una veda en la Región Hidrológica número 18 Balsas*. México, Diario Oficial: 22/03/2011.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México), Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. y Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas (2014). *Ríos libres y vivos*, introducción



al caudal ecológico y reservas de agua. Cuadernos de divulgación. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. SEMARNAT.

Spores, R. (1969). "Settlement, Farming Technology, and Environment in the Nochixtlan Valley." *Science* **166**(3905): 557-569.

Spores, R. (2007). *Ñuu Ñudzabui: La Mixteca de Oaxaca. La evolución de la cultura mixteca desde los primeros pueblos preclásicos hasta la Independencia.* Oaxaca, Oax.

Takahashi, H., Ed. (1981). *De la huerta a la hacienda: el origen de la producción agropecuaria en la Mixteca Costera.* Lecturas históricas del estado de Oaxaca. México, Instituto Nacional de Antropología e Historia.