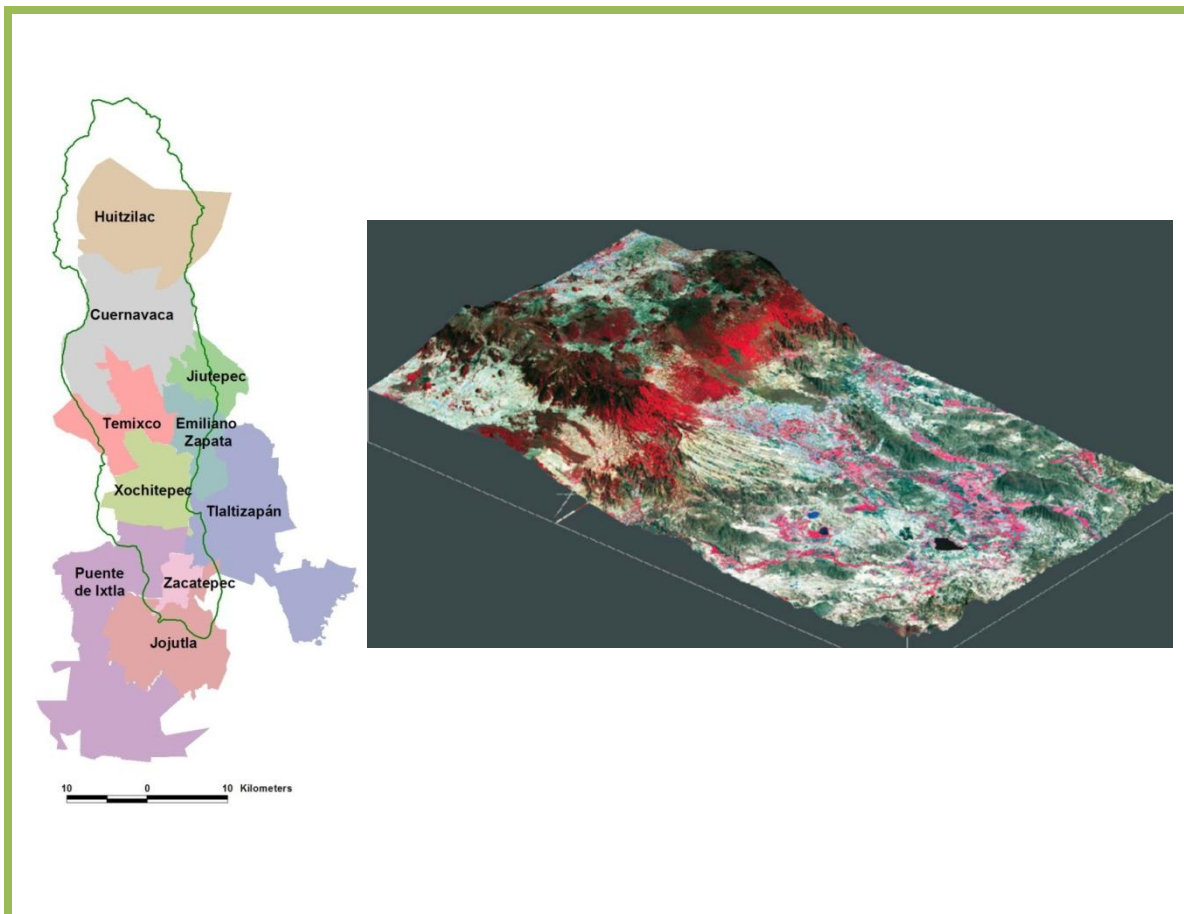


ESTRATEGIA PARA LA APLICACIÓN DE LA NORMA DE CAUDAL AMBIENTAL HACIA UN ENFOQUE ADAPTATIVO AL CAMBIO CLIMÁTICO Y AL RIESGO AMBIENTAL



Diciembre de 2012

Contenido

1. Introducción.....	5
2. Objetivos.....	7
3. Antecedentes.....	8
4. Metodología.....	12
5. Resultados	15
5.1 Delimitación de la cuenca.....	15
5.2 Estaciones hidrométricas y climatológicas	20
5.3 Régimen natural de caudal en el río Apatlaco (IHA) intra e Inter anual, gráficas y descripción).....	23
5.4 Alteraciones hidrológicas (buscar porque hay dos presas).....	28
5.5 Comportamiento de la precipitación y temperatura (gráficas con R) Estacionalidad y tendencia (gráficas con R).....	29
5.7 Aplicación de la NMX de caudal ecológico - NUEVA.....	34
5.8 Calidad del agua histórica y actual (análisis de estaciones Conagua y las que trabajaron este año con Conagua)	39
5.9 Especies acuáticas de interés y su distribución	43
5.10 Análisis de riesgo ambiental por conservación de especies	43
6. Conclusiones	44
7. Referencias	45

Figuras

Figura 1. Mapa topográfico de la cuenca del Río Apatlaco.....	15
Figura 2. Hidrología de la cuenca del Río Apatlaco	16
Figura 3 Municipios del estado de Morelos que comprenden la cuenca del Río Apatlaco. 17	
Figura 4. Uso de suelo y vegetación.	20
Figura 5. Localización de la s Estaciones hidrométricas Temixco y Zacatepec.	21
Figura 6. Distribución de Estaciones Climatológicas.	22
Figura 7. Promedios diarios históricos para la estación hidrométrica Temixco.	23
Figura 8. Promedios diarios históricos para la estación hidrométrica Zacatepec	24
Figura 9. Variación inter-anual para la estación Temixco	24
Figura 10. Variación inter-anual para la estación Zacatepec	25
Figura 11. Curva de duración o probabilidad de excedencia de la EH Temixco.....	26
Figura 12. Curva de duración o probabilidad de excedencia de la EH Zacatepec.....	26
Figura 13. Descomposición de series de caudal mensuales para la estación Temixco en (m ³ /s).	27
Figura 14. Descomposición de series de caudal mensuales para la estación Zacatepec en (m ³ /s).	27
Figura 15. Precipitación histórica en la estación Temixco	29
Figura 16. Precipitación histórica en la estación Zacatepec.....	29
Figura 17. Temperatura máxima histórica en la estación Temixco.....	30
Figura 18. Temperatura máxima histórica en la estación Zacatepec.....	30
Figura 19. Temperatura mínima histórica en la estación Temixco	31
Figura 20. Temperatura mínima histórica en la estación Zacatepec	31
Figura 21. Precipitación mensual para la estación Temixco	32
Figura 22. Precipitación mensual para la estación Zacatepec	32
Figura 23. Descomposición de series mensuales para la estación Zacatepec	33
Figura 23. Descomposición de series mensuales para la estación Zacatepec	33
Figura 25 y 26. Conductividad específica y oxígeno disuelto	40
Figura 27 y 28. pH y Temperatura	40
Figura 29 y 30. Coliformes Fecales y Totales.....	41
Figura 31 y 32. pH y Temperatura	41
Figura 33 y 34. Fósforo soluble y sulfatos disponibles	42
Figura 35 y 36. Sólidos suspendidos totales y cloruros.....	42
Figura 37. Grasas y Aceites.....	43

Tablas

Tabla 1. Superficies en km ² de los municipios que componen la cuenca del Río Apatlaco y porcentajes con respecto a la cuenca.	17
Tabla 2. Estaciones Hidrométricas sobre el Río Apatlaco.	21
Tabla 3. Información de las estaciones climatológicas	22

1. Introducción

Con el propósito de mantener el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, así como permitir la protección y conectividad de los ecosistemas riparios, ecosistemas acuáticos terrestres y costeros, es necesario que se garantice un régimen de caudal ecológico en las corrientes o escurrimientos. Dicho régimen se integra con los escurrimientos de las distintas micro y subcuencas que integran la totalidad de la cuenca de captación y desembocan en los sistemas costeros. Por lo que evaluar y definir el régimen de cada subcuenca es importante a nivel regional para la conservación de los ecosistemas.

Existe una problemática nacional relativa a la disminución del agua en los cauces, derivada de la competencia entre usos y la incompleta regulación conforme a la disponibilidad y asignación del recurso, como por ejemplo, la demanda de agua en sitios aguas arriba de las cuencas hidrológicas, no considera la conservación de un escurrimiento hacia las partes bajas, así como en el caso del agua subterránea no considera la descarga del acuífero hacia cuerpos de agua superficiales que constituyen el caudal base de los ríos. Al no existir una normatividad específica con respecto al caudal ecológico, las concesiones y asignaciones, así como los permisos de descarga, no han considerado plenamente la necesidad de establecer un régimen de caudal, que es de gran importancia para la preservación de los ecosistemas: fluviales, lacustres, lagunares y estuarinos.

La definición de caudal ecológico es la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales.

Esto implica que además proveer agua para los usos doméstico, público urbano, pecuario y agrícola, es posible mantener caudales provenientes tanto del escurrimiento, como de las descargas de los acuíferos para la conservación de los

ecosistemas lóticos (ríos perenes, intermitentes y efímeros), lénticos (lagos, lagunas, y humedales) y riparios con la aportación de los acuíferos al ecosistema, que sirven para conservar la biodiversidad y los servicios ambientales.

El régimen de caudales ecológicos es un instrumento de la gestión del agua, fundamentado en el principio ecológico del régimen natural y el gradiente de la condición biológica, que busca establecer un régimen para sostener a los ecosistemas, los usos del agua y las necesidades de almacenamiento a lo largo del año. Conforme con los criterios establecidos en la norma de caudal ecológico bajo revisión, se clasificarán los tramos de la subcuenca del río Apatlaco de acuerdo con: 1) aspectos bióticos; 2) integridad ecológica y 3) alteración eco hidrológica para determinar su importancia ecológica. Asimismo, Se determinará su presión de uso en los tramos en que se divida la subcuenca. Posteriormente con la aplicación de metodologías hidrológicas y de hábitat se definirá la estrategia de caudal que considere las presiones por el cambio climático y el riesgo a las poblaciones bióticas.

2. Objetivos

Aplicar herramientas hidrológicas, geográficas y ambientales para identificar el régimen natural de caudal y calcular los caudales ecológicos en la cuenca del río Apatlaco.

Definir los indicadores ambientales de seguimiento bajo esquemas de aprovechamiento asociados al cambio climático.

Definir los indicadores de riesgo ecológico o ambiental que guíen la estrategia de conservación y aprovechamiento para la cuenca.

3. Antecedentes

IHA

La metodología IHA-RVN se ha consolidado al aplicarse en más de 80 casos alrededor del mundo. (ConserveOnline, 2011). Estas aplicaciones se pueden clasificar en tres grupos principales:

Investigación Hidrológica: El uso de la metodología y el software IHA-RVA en la evaluación de cambios en las condiciones hidrológicas, incluyendo cambios causados por actividades manejadas por el hombre (embalses, áreas recreativas, Distritos de riego, presas para abastecimiento de agua potable, etc.)

Investigación Ecológica: Su uso en la evaluación de conexiones entre las condiciones hidrológicas y el tipo de respuesta ecológica. En este se incluyen estudios específicos de influencias sobre algunas especies, transporte de sedimentos y distribución de la salinidad.

Formulación de recomendaciones de caudales ambientales: Este uso incluye trabajos donde el software IHA-RVA que incluye parámetros hidrológicos se utiliza para establecer los rangos o intervalos de variación y monitoreo de ciertas variables ambientales.

Con el software IHA V 7.1 (TNC (The nature Conservancy), 2009) se realizan los análisis de indicadores de alteración hidrológica (IHA) y del intervalo de variabilidad (RVA) de las series de tiempo intra e interanuales de 33 parámetros hidrológicos, que se obtienen de los registros de los caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas. Dichos parámetros se clasifican dentro de cinco grupos, siendo el primero los caudales medios mensuales; el segundo los máximos y mínimos para distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días). El tercer grupo corresponde a las fechas o momento en que ocurren los extremos mínimos y máximos, el cuarto grupo a la duración y conteo de pulsos altos y bajos, mientras que el quinto grupo corresponde a los parámetros asociados a la tasa de

cambio, tales como el número de veces que el hidrograma cambia a una condición de incremento a decremento y viceversa.

Del análisis de series de datos hidrológicos diarios, mensuales y anuales (con mejores resultados cuando se cuenta con 20 años de registros o más), se obtiene el régimen de variación natural del caudal, el software realiza análisis de regresión y tendencias mensuales.

Para cada indicador se realizan los análisis paramétricos o no paramétricos estimando las medias o medianas y su dispersión, por desviaciones estándar o percentiles a lo largo de la serie. Posteriormente se comparan las alteraciones impuestas por la regulación del caudal por las presas u otra infraestructura o manejo, conforme a su comportamiento en las series de tiempo del sistema natural dentro del intervalo de variabilidad de cada parámetro dado por +/- una desviación estándar o entre los percentiles 25% a 75%.

Las modificaciones a este intervalo de variación también sirven para evaluar el desempeño de la asignación de caudales ambientales en una corriente regulada estableciendo las metas de cumplimiento. Los distintos percentiles son útiles para recomendar caudales ambientales mensuales o por distintos periodos de tiempo, en lugar de un caudal mínimo a lo largo de todo el año. Este régimen variable contribuye a la salud de las poblaciones y al mantenimiento del ecosistema fluvial.

Con el desarrollo de información sobre el cauce, las inundaciones y los hábitat disponibles, esta metodología puede agrupar los parámetros hidrológicos en cinco componentes del caudal ambiental que corresponden a caudales extremos bajos, caudales bajos, pulsos altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones de 2 y 10 años de retorno respectivamente, IHA despliega gráficamente éstos cinco componentes ambientales que influyen en los ecosistemas acuáticos y riparios, que pueden desglosarse en 34 parámetros EFC (Environmental Flow Components). Por medio de este análisis se asocia un significado al intervalo de variabilidad de los parámetros hidrológicos en términos de los procesos relacionados con la dinámica del cauce y los requerimientos de los

ecosistemas acuáticos y riparios, así como del alcance e importancia de las inundaciones. (Richter et al., 1998)

Estadísticas en R

R es un conjunto integrado de programas para manipulación de datos, cálculo y gráficos. Entre otras características dispone de:

- Almacenamiento y manipulación efectiva de datos,
- Operadores para cálculo sobre variables indexadas (Arrays), en particular matrices,
- Una amplia, coherente e integrada colección de herramientas para análisis de datos, posibilidades graficas para análisis de datos, que funcionan directamente sobre pantalla o impresora, y
- Un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas. (Debe destacarse que muchas de las funciones suministradas con el sistema están escritas en el lenguaje R)

Se considera al R como un sistema completamente diseñado y coherente, antes que como una agregación incremental de herramientas muy específicas e inflexibles, como ocurre frecuentemente con otros programas de análisis de datos.

R es en gran parte un vehículo para el desarrollo de nuevos métodos de análisis interactivo de datos. Como tal es muy dinámico y las diferentes versiones no siempre son totalmente compatibles con las anteriores. Algunos usuarios prefieren los cambios debido a los nuevos métodos y tecnología que los acompañan, a otros sin embargo les molesta ya que algún código anterior deja de funcionar. Aunque R puede entenderse como un lenguaje de programación, los programas escritos en R deben considerarse esencialmente efímeros.

R se puede describir como un entorno en el que se han implementado muchas técnicas estadísticas, tanto clásicas como modernas. Algunas están incluidas en el entorno base de R y otras se acompañan en forma de bibliotecas (packages). Junto con R se incluyen ocho

bibliotecas (llamadas bibliotecas estándar) pero otras muchas están disponibles a través de Internet en CRAN (The Comprehensive R Archive Network - <http://www.r-project.org>).

Como hemos indicado, muchas técnicas estadísticas, desde las clásicas hasta la última metodología, están disponibles en R, pero los usuarios necesitarán estar dispuestos a trabajar un poco para poder encontrarlas.

Existe una diferencia fundamental en la filosofía que subyace en R y la de otros sistemas estadísticos. En R, un análisis estadístico se realiza en una serie de pasos, con unos resultados intermedios que se van almacenando en objetos, para ser observados o analizados posteriormente, produciendo unas salidas mínimas. Sin embargo en SAS o SPSS se obtendrá de modo inmediato una salida copiosa para cualquier análisis, por ejemplo, una regresión o un análisis discriminante.

4. Metodología

Para conocer los caudales ecológicos para el Río Apatlaco, se utilizó el software IHA-RVN-7.1 (Régimen de variación natural e indicadores de alteración hidrológica). Esta metodología se ha consolidado para el análisis estadístico y la definición de intervalos ya sea como porcentajes o percentiles en los que debe mantenerse el caudal ecológico en las corrientes cuando se presenta competencia por el agua.

Metodología IHA

Con el software IHA-RVA V-7.1 (TNC, 2009) se realizan los análisis de indicadores de alteración hidrológica (IHA) y del rango de variabilidad (RVA) de las series de tiempo intra e interanuales de 34 parámetros o indicadores hidrológicos que se obtienen de los registros de los caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas. Dichos parámetros se clasifican dentro de cinco grupos, siendo el primero los caudales medios mensuales; el segundo los máximos y mínimos para distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días). El tercer grupo corresponde a las fechas o momento en que ocurren los extremos mínimos y máximos, así como a un índice de caudal base, calculado como el cociente entre el caudal mínimo de 7 días/ caudal medio anual. El cuarto grupo a la duración y conteo de pulsos altos y bajos, mientras que el quinto grupo corresponde a los parámetros asociados a la tasa de cambio, tales como el número de veces que el hidrograma cambia a una condición de incremento a decremento y viceversa. En total son 34 parámetros hidrológicos los que pueden ser analizados conforme a lo detallado de cada estudio.

Del análisis de series de datos hidrológicos diarios, mensuales y anuales, se obtiene el régimen de variación natural del caudal, el software realiza análisis de regresión de cada parámetro hidrológico para determinar su tendencia a través del tiempo y puede interpolar datos faltantes.

Para cada parámetro se realizan los análisis paramétricos o no paramétricos estimando las medias o medianas y su dispersión, por desviaciones estándar o percentiles a lo largo de la serie de datos. En el análisis paramétrico, se asume una distribución normal y el área bajo la curva de más/menos una desviación estándar concentra el 68.27% ($X - s$) y ($X + s$), mientras que el 95.45% se ubica en ($X - 2s$) y ($X + 2s$) y el 99.73% de todos los datos dentro del área en ($X - 3s$) y ($X + 3s$).

El análisis no paramétrico se realiza utilizando las medianas, cuartiles y percentiles. Los cuartiles dividen el conjunto de datos en cuatro partes iguales y pueden leerse en los gráficos de cajas y bigotes, siendo el límite inferior el percentil 25 (25% de los datos menores o igual a este valor), la mediana (50%) y el límite superior el percentil 75 (75% de los datos menor a este valor y 25% mayores al mismo). De la igual forma, el conjunto de datos de la muestra se puede dividir en 100 partes iguales por medio de percentiles.

El intervalo de variabilidad natural de cada parámetro dado por +/- una desviación estándar o bien entre los percentiles 25 a 75, conforme al comportamiento de las series de tiempo del sistema natural. Los extremos de los percentiles 10 a 5 o bien 90 a 95 representan los datos más bajos (en años secos) o bien más altos (en años lluviosos). De esta forma, se pueden comparar las alteraciones a imponer por la regulación del caudal por las presas u otra infraestructura de extracción o manejo para identificar en que percentil se está dejando el caudal ya sea mensual, estacional, o bien máximo o mínimo de algún período de interés.

Este intervalo o rango de variabilidad también sirve para evaluar el desempeño de la asignación y liberación de caudales ambientales en una corriente regulada estableciendo las metas de cumplimiento. El Rango de Variabilidad (Range Variability Approach - RVA) fue desarrollado en respuesta al creciente interés de usar la variabilidad natural para recomendar caudales ambientales y no insistir con el uso de un caudal mínimo a lo largo de todo el año. Este régimen variable contribuye a la salud de las poblaciones y al mantenimiento del ecosistema fluvial.

Para esta propuesta de caudal se analizaron los caudales mensuales y los de distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días máximos y mínimos).

Estadísticas con R

Se han analizado en R los datos diarios y mensuales de dos estaciones Temixco y Zacatepec, datos tanto hidrológicos, así como climatológicos.

Para los dos conjuntos de datos, hidrológicos y climatológicos, se han realizado análisis de distribución así como desviación estándar, también análisis de series de tiempo para conocer su comportamiento y los componentes: estacional, aleatoriedad y de tendencia para los cada serie de datos mensuales.

El lenguaje R realiza los análisis a según las necesidades del usuario. Cuenta con librerías establecidas y otros paquetes descargables para adaptarse estas necesidades.

Para cada análisis es necesario programar scripts con rutinas específicas para cada serie de datos o según sea el resultado esperado de los análisis.

R es una herramienta caracterizada por ser un entorno de trabajo adaptable a las necesidades del usuario, el uso de scripts ahorra tiempo y facilita el análisis de los datos ya que no es necesario tener las rutinas terminadas con miles de líneas de código, sino solo unas cuantas que al hacer uso de las librerías hacen que el trabajo sea más ágil y rápido.

5. Resultados

5.1 Delimitación de la cuenca

La cuenca del Río Apatlaco se localiza entre las coordenadas geográficas 19° 13' 24" y 18° 36' 00" latitud norte, y 99° 09' 55" y 99° 21' 11" longitud oeste; pertenece a la Región Hidrológica del Río Balsas número 18, Subregión del Alto Balsas, correspondiendo a la a la Región Administrativa IV de la Comisión Nacional del Agua. Comprende tres entidades federativas que son: Edo. de México, Distrito Federal y el estado de morelos. Al Estado de Morelos pertenece la mayor proporción de su cuenca que se origina en el municipio de Huitzilac. Como cauce permanente se le reconoce a partir del manantial de Chapultepec, en la ciudad de Cuernavaca, y hasta su desembocadura en el río Yautepec, en el municipio del mismo nombre, para integrarse más adelante al Amacuzac, y éste en el Balsas, que finalmente descarga sus aguas en el Océano Pacífico.

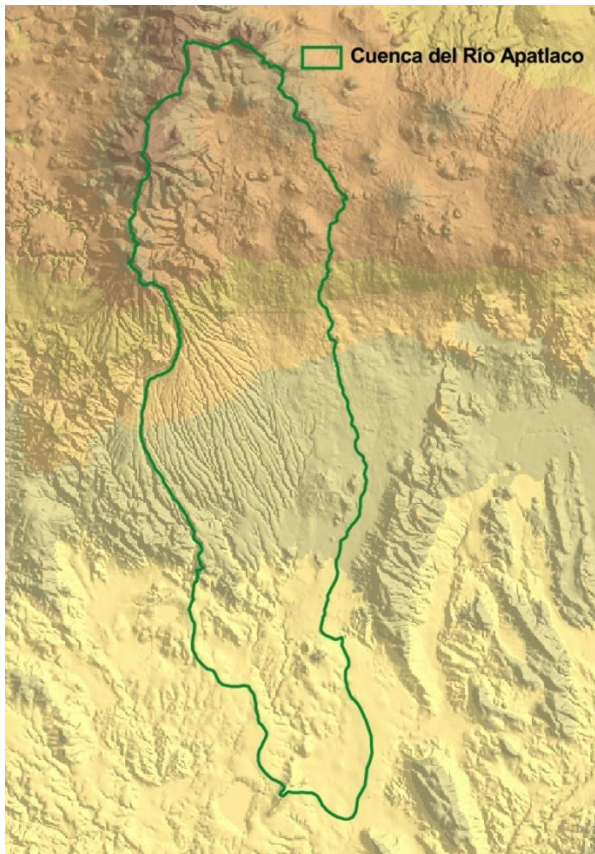


Figura 1. Mapa topográfico de la cuenca del Río Apatlaco.

La cuenca, tiene un área aproximada de 746 km², de los cuales 656.5 km² se encuentran en Morelos. El río Apatlaco tiene una longitud de cauce permanente de 63 km hasta su confluencia con el río Yautepec, y una pendiente de entre el 5 y el 15% desde su origen en la Subprovincia fisiográfica Lagos y Volcanes de Anahuac, en Huitzilac como su parte alta, desde la que desciende desde más de 2500 msnm hacia su nivel base de erosión en la cuenca del río Yautepec, a 880 msnm en su parte baja.

Hidrología

La cuenca está delimitada naturalmente al norte por las lagunas de Zempoala y la serranía de Huitzilac; al sur por la cuenca del río Yautepec y al este por la sierra de Tepoztlán-Tlaltizapán. Al oeste la limitan la cuenca del río Tembembe y las lagunas de Coatetelco y El Rodeo, y al suroeste la cuenca del lago de Tequesquitengo.

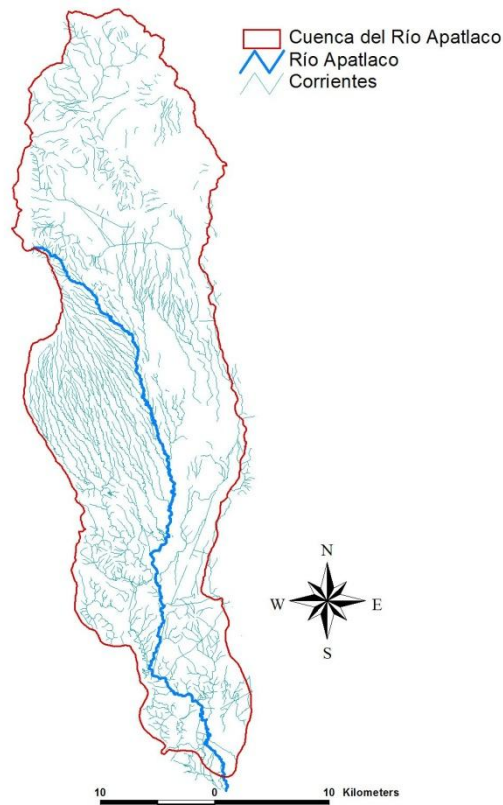


Figura 2. Hidrología de la cuenca del Río Apatlaco

Municipios

Los municipios del estado de Morelos que comprenden la cuenca del Río Apatlaco desde la parte alta hasta la parte baja son los siguientes: Huitzilac, Cuernavaca, Jiutepec, Emiliano Zapata, Temixco, Xochitepec, Puente de Ixtla, Tlaltizapán, Zacatepec, Jojutla. En la figura 3 se puede observar la influencia que tiene cada municipio sobre la cuenca del Río Apatlaco. La tabla 1 muestra las áreas totales de cada municipio y la parte que ocupan dentro de la cuenca, también se incluyen porcentajes de estas áreas.



Figura 3 Municipios del estado de Morelos que comprenden la cuenca del Río Apatlaco.

Tabla 1. Superficies en km² de los municipios que componen la cuenca del Río Apatlaco y porcentajes con respecto a la cuenca.

MUNICIPIO	Superficie (km ²)		Porcentaje (%)	
	Total	En la Cuenca del río Apatlaco	Del total del municipio en la cuenca	Respecto a la superficie total de la cuenca
Huitzilac	190.18	146.44	77	22
Cuernavaca	207.80	181.82	88	28
Jiutepec	49.24	35.16	71	5
Emiliano Zapata	64.98	27.03	41	4
Temixco	87.69	79.71	91	12
Xochitepec	89.14	89.14	100	14
Puente de Ixtla	299.17	38.89	13	6
Tlaltizapán	236.66	18.93	8	3
Zacatepec	28.53	28.53	100	4
Jojutla	142.63	10.84	8	2
Totales	1396.02	656.49		100

Cada uno de los municipios aporta al Río Apatlaco volúmenes de agua por medio de causes, barrancas y arroyos pequeños. A continuación se describen por municipio, cada uno de los cauces principales que aportan caudal al Río Apatlaco.

Cauces intermedios

En su recorrido, se encuentran los ojos de agua Atexcapan, Atzompan, Oclatzingo, El Cedro y El Palomo, además de dos pozos artesianos, uno en la localidad de Sierra Encantada y el otro en la de Guayacahuala. Se cuenta con varias barrancas entre las que destacan las barrancas del Muerto, Grande y de Tetecuintla.

Cauces de Cuernavaca

Los arroyos permanentes de Cuernavaca son el Salto y Ojo de Agua, y sus manantiales El Limón, Chapultepec, Santa María Tepeiti y el Túnel. Además de los arroyos Pilcaya, Amanalco, El Limón, Tlazala, Los Sabinos, Cuantepec, Salado, Fría, Coltepec y Poza Honda.

Cauces de Jiutepec

Aguas de los montes y sierras de Chalma y Ajusco, a través de la barranca de Analco. Barranca es la Gachupina. En el Texcal existe la laguna de Ahueyapan, formada por el afloramiento de varios manantiales. Existe también el manantial de Las Fuentes.

Cauces de Emiliano Zapata

El río se abastece por los ríos Agua Salada y Yautepec; y con los manantiales de Palo Escrito y la Sanguijuela, a la vez que con los arroyos Las Fuentes, Palo Blanco, Canal de Agua Dulce, Salado, La Rosa y Roque, así como con los cauces de las barrancas de Tetecala y San Vicente.

Cauces en Temixco

En la colonia Alta Palmira pasa la corriente llamada Tilapeña, así como por las localidades de Pueblo Viejo y Panocheras. Al poniente discurren las corrientes del río Toto o Atengo, que pasa por los pueblos Tetlama y Cuentepec, con rumbo al poniente del estado. Los ríos con que cuenta el municipio son el Atengo, El Pollo,

Panocheras y Tembembe. Las barrancas principales son la Colorada, El Limón, Pilapeña y Seca.

Cauces de Xochitepec

Río Tetlama, y varios arroyos de caudal permanente: el Salado, el Tlazala y el Colotepec, y los manantiales San Ramón, Palo Bolero, Real del Puente y Campo La Vega. El municipio cuenta además con cuatro presas, dos de ellas sobre el río Apatlaco, que se nutren de los ríos de Real del Puente y Alpuyeca. Por su parte, a la altura de Alpuyeca, el Tetlama riega los campos de Xoxocotla, cuyos escurrimientos a 51 través de los canales de riego llegan después al lago de Tequesquitengo.

Cauces de Puente de Ixtla

Las barrancas Salada, Cacahuananche, Ahuehuetzingo, Los Arcos, Contreras y Ranchito, y se incluyen en el área municipal dos quintas partes de la laguna de Tequesquitengo y la presa Emiliano Zapata, en Tilzapotla.

Cauces de Jojutla

Río Alpuyeca, que recoge los derrames de las cercanías de Xoxocotla y toma entonces el nombre de Apatlaco. El Amacuzac atraviesa las localidades de Chisco, Tehuixtla, Río Seco y Vicente Aranda, y en Tenayuca recibe al río Higuierón o de Yautepec; se contabilizan, además, las restantes tres quintas partes de la laguna de Tequesquitengo. (CONAGUA)

Uso de suelo y vegetación

El cambio de uso del suelo se debió a varios factores, entre los que se destacan: creación de zonas industriales, crecimiento poblacional interno y por migración (tanto turística-recreativa, laboral, y residencial); los sismos de 1985 de la ciudad de México, y la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio. Además del crecimiento de la oferta de unidades habitacionales y vivienda de fin de semana. El resultado del cambio del uso del suelo se reflejó en el incremento del área urbana, que se dio de manera no planificada y propició la instalación de asentamientos humanos en lugares no propios para el desarrollo urbano, tanto por

su ubicación como por su distribución. La figura 4 muestra los diferentes usos del suelo para la cuenca del Rio Apatlaco.

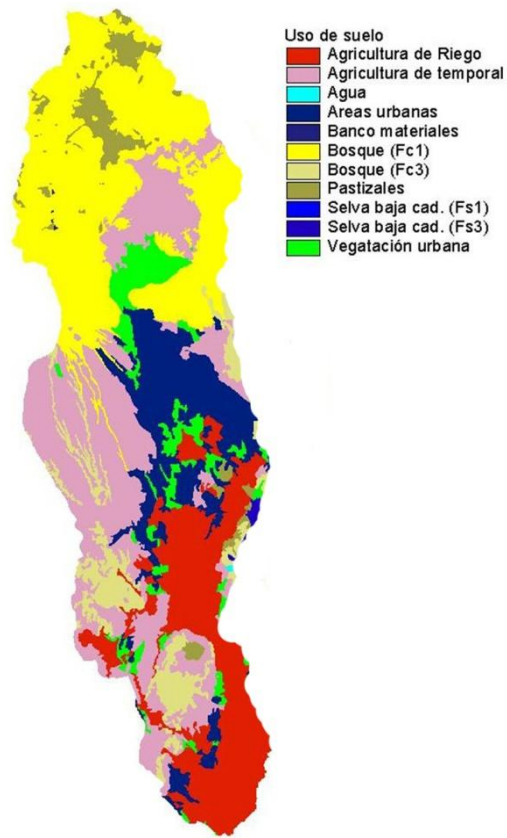


Figura 4. Uso de suelo y vegetación.

5.2 Estaciones hidrométricas y climatológicas

Estaciones hidrométricas

La cuenca cuenta con 7 estaciones hidrométricas distribuidas principalmente en la parte media y baja de la cuenca.

Para este estudio se seleccionaron dos estaciones que se encuentran sobre el río, estas estaciones son: Temixco y Zacatepec, figura 5. La tabla 2 muestra los detalles de cada una de estas estaciones.

Tabla 2. Estaciones Hidrométricas sobre el Río Apatlaco.

Clave	Nombre	G_LAT	G_LONG	Años de Registro
18271	Temixco	18.854	-99.221	1956-2002
18264	Zacatepec	18.650	-99.196	1955-2002

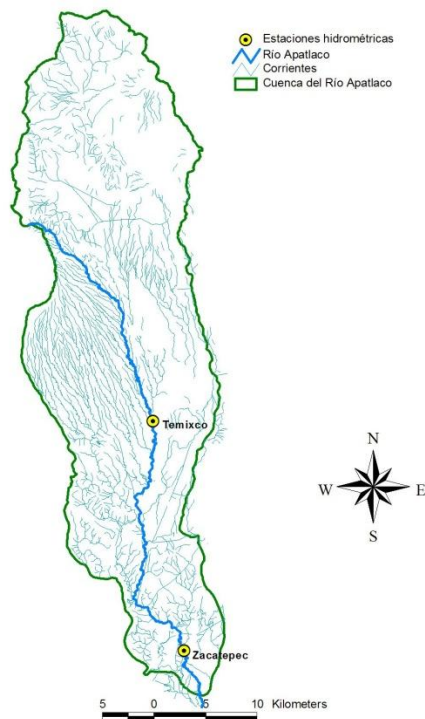


Figura 5. Localización de las Estaciones hidrométricas Temixco y Zacatepec.

Estaciones climatológicas

La cuenca cuenta con 10 estaciones climatológicas convencionales y XX estaciones automáticas, de las cuales se obtuvieron datos de precipitación y temperatura máxima y mínima, la figura 6 muestra la distribución de estas estaciones a lo largo y ancho de la cuenca, en la tabla 3 se observa la información detallada de cada una de estas estaciones climatológicas convencionales.

Tabla 3. Información de las estaciones climatológicas

Clave	Nombre	Años de Registro	G_Lat	m_Lat	G_Lon	m_Lon	Elev. MSNM
17002	Cuernavaca A.Col. Empleado	1939-2001	-99	15	18	55	1560
17004	Cuernavaca, Cuernavaca	1955-2006	-99	15	18	55	1529
17014	Temixco, Temixco	1957-2006	-99	14	18	51	971
17022	Tres Cumbres, Huitzilac	1967-2005	-99	15	19	4	2800
17026	Zacatepec A.C.A.E.	1961-2005	-99	11	18	39	1226
17037	Esc. de Biología U.A.E.M	1975-1979	-99	15	18	58	1100
17042	Zacatepec, Morelos	1944-1990	-99	11	18	39	1226
17047	Huitzilac, Huitzilac	1961-2007	-99	16	19	1	2850
17072	Alpuyeca, Xochitepec	1969-2002	-99	16	18	44	1050
17075	Jojutla, Jojutla (DGE)	1955-1983	-99	11	18	37	1000

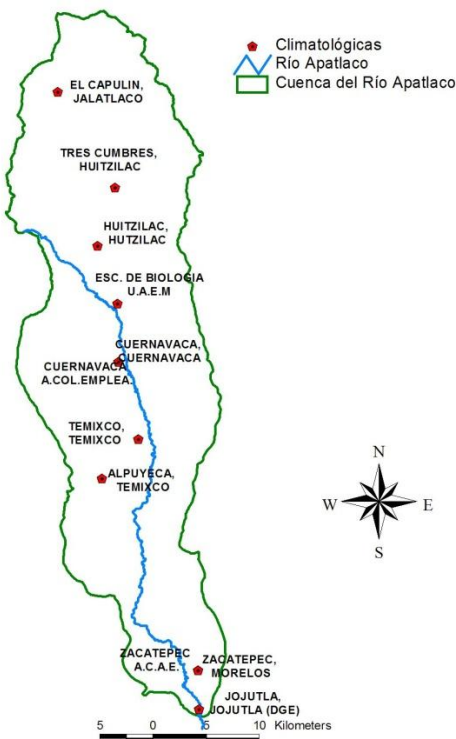


Figura 6. Distribución de Estaciones Climatológicas.

5.3 Régimen natural de caudal en el río Apatlaco (IHA) intra e Inter anual, gráficas y descripción)

En cada una de las estaciones hidrométricas de la cuenca, se reconoce el caudal en m^3/s que pasa en el sitio y el volumen en m^3 que escurre cada día, mes o año. Las gráficas intra- anuales, señalan la magnitud y duración de las estaciones de lluvia y estiaje al mismo tiempo muestran las fechas donde estas inician o terminan.

En la E.H. Temixco los caudales son bajos, con valores mínimos de $1 m^3/s$ en un día de abril, que equivale en volumen a $86\,400 m^3/s$ por un día y con caudales máximos de $7 m^3/s$ el volumen se incrementa a $604\,800 m^3/día$ en el mes de septiembre, Figura 7.

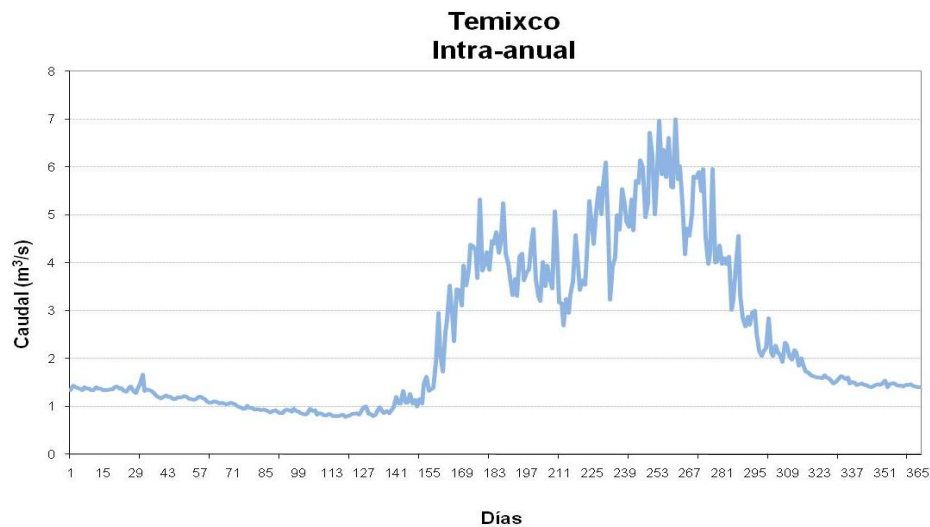


Figura 7. Promedios diarios históricos para la estación hidrométrica Temixco.

Mientras que en Zacatepec, localizada aguas abajo, los caudales son menores debido a las extracciones en estiaje, pero se incrementan durante las lluvias a hasta $20 m^3/s$, figura 8.

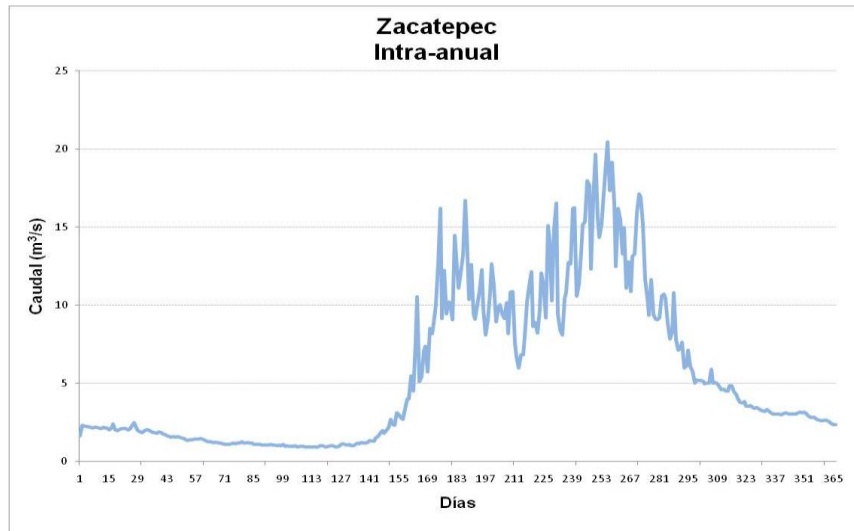


Figura 8. Promedios diarios históricos para la estación hidrométrica Zacatepec

La variabilidad entre años secos, promedio y húmedos es un indicador de los ciclos que se presentan en el río, aunque en el Río Apatlaco, los valores altos pueden estar influenciados por las descargas de aguas provenientes de otras fuentes como agrícolas o urbanas extraídas de pozos, las figuras 9 y 10 muestran la variabilidad inter-anual en la que se observan los años secos, promedio y húmedos, así como eventos extremos.

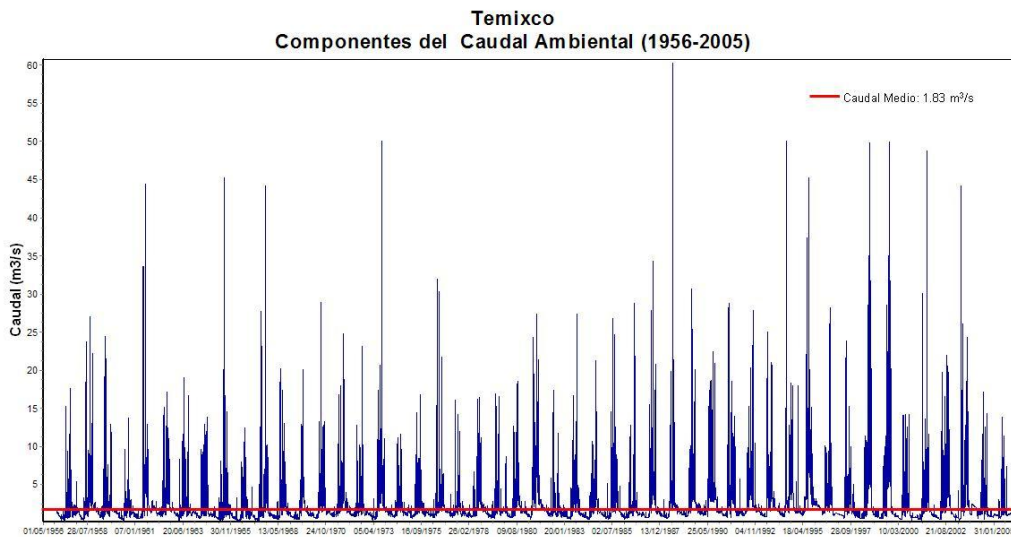


Figura 9. Variación inter-anual para la estación Temixco

En la estación Zacatepec, el incremento observado a partir de 1988 se puede asociar tanto al crecimiento demográfico como a las actividades agrícolas que aumentan el caudal del río.

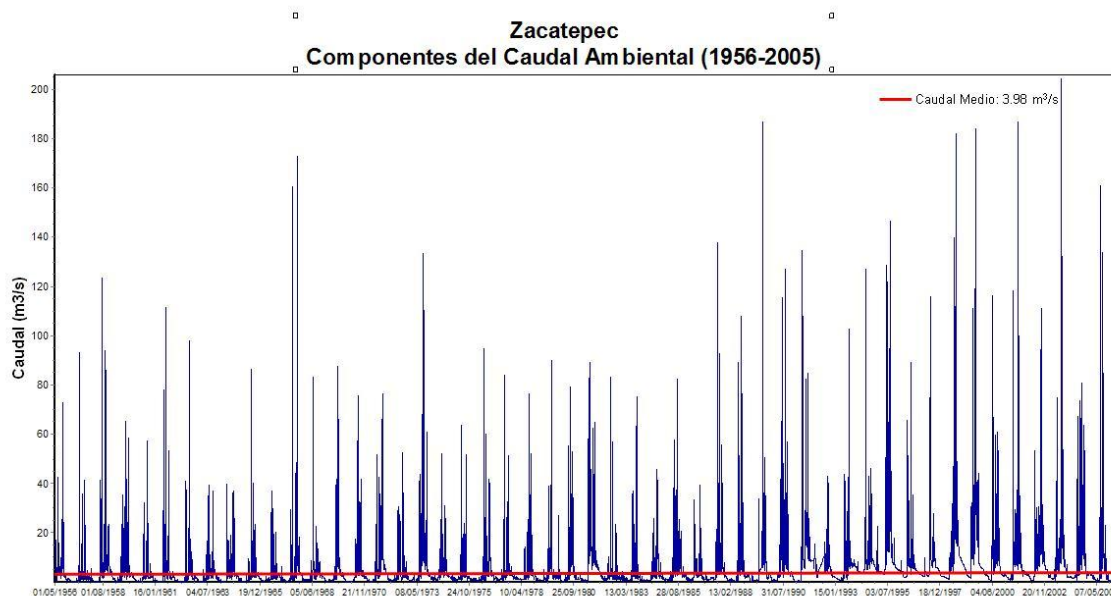


Figura 10. Variación inter-anual para la estación Zacatepec

Curvas de duración de caudal o probabilidad de Excedencia.

Es importante conocer la distribución de los datos y cuales son los caudales que mas se har repetido a tra vez de los años, esto nos ayuda a conocer los periodos de retorno de eventos extremos y de esta manera predecir dichos eventos. Las figuras 11 y 12, muestran las curvas de duración obtenidas de IHA, en las cuales se observa esta las probabilidades que tienen los caudales para presentarse históricamente.

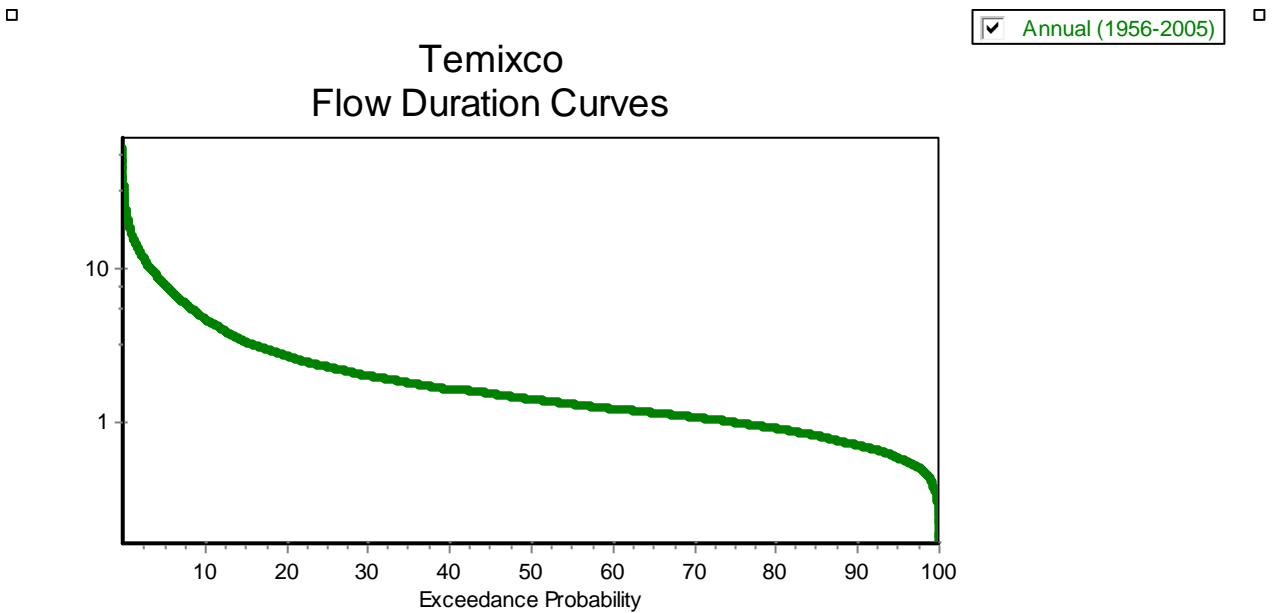


Figura 11. Curva de duración o probabilidad de excedencia de la EH Temixco

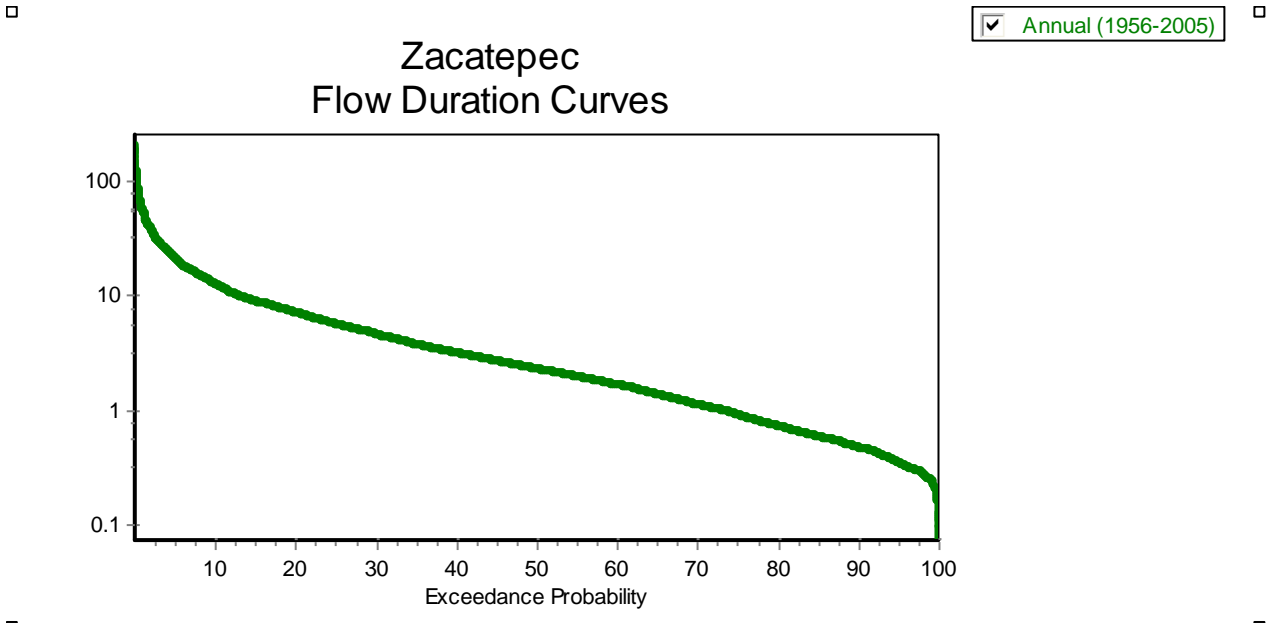


Figura 12. Curva de duración o probabilidad de excedencia de la EH Zacatepec

Estacionalidad y tendencia de los datos

Los resultados del análisis de la estacionalidad y tendencia de los datos mensuales para las dos estaciones hidrométricas realizado en R, dio como resultado una descomposición de las series mensuales, esta descomposición se muestra en las figuras 13 y 14, para Temixco y Zacatepec respectivamente.

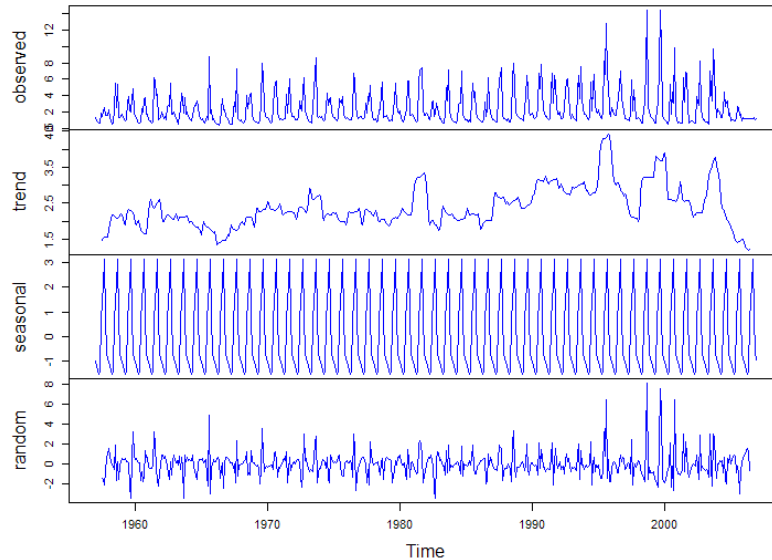


Figura 13. Descomposición de series de caudal mensuales para la estación Temixco en (m³/s).

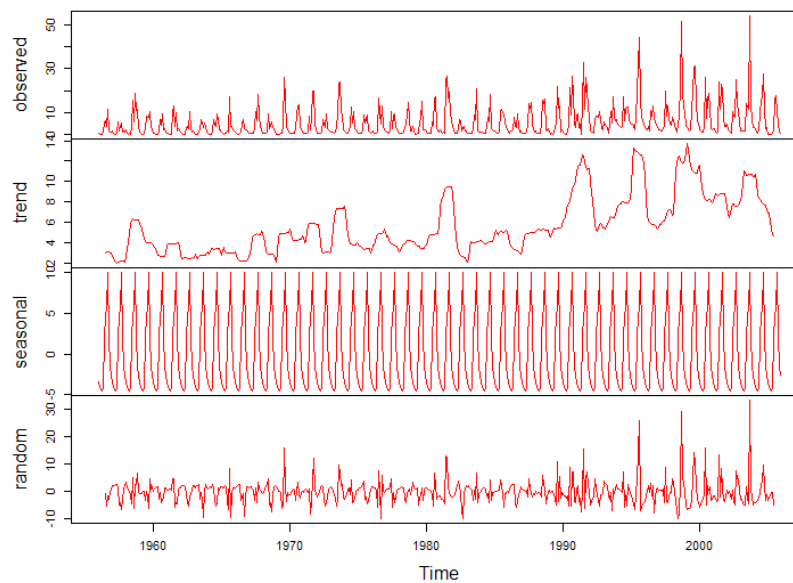


Figura 14. Descomposición de series de caudal mensuales para la estación Zacatepec en (m³/s).

5.4 Alteraciones hidrológicas (buscar porque hay dos presas)

5.5 Comportamiento de la precipitación y temperatura (gráficas con R) Estacionalidad y tendencia (gráficas con R)

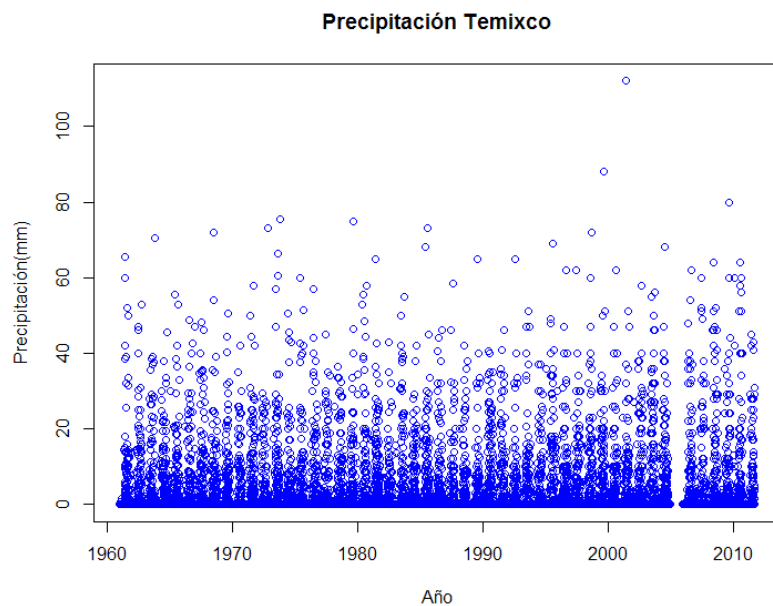


Figura 15. Precipitación histórica en la estación Temixco

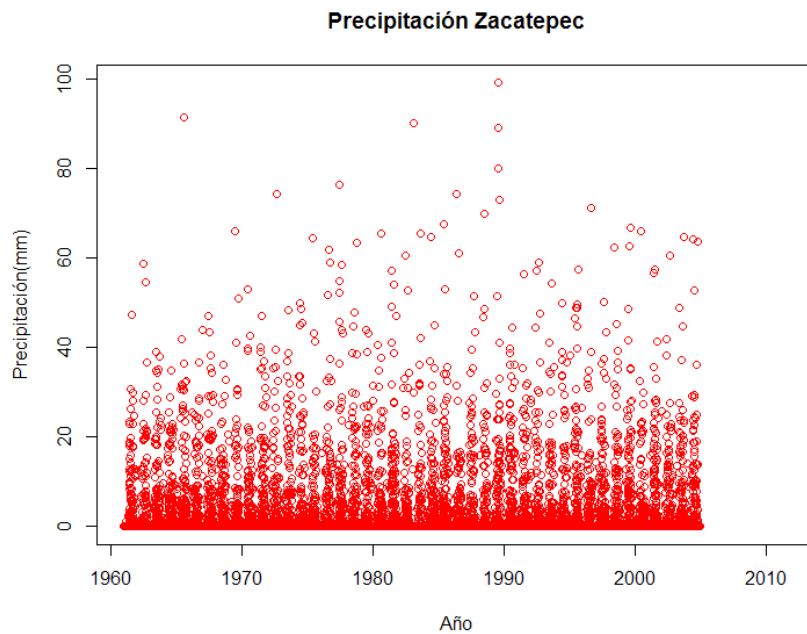


Figura 16. Precipitación histórica en la estación Zacatepec

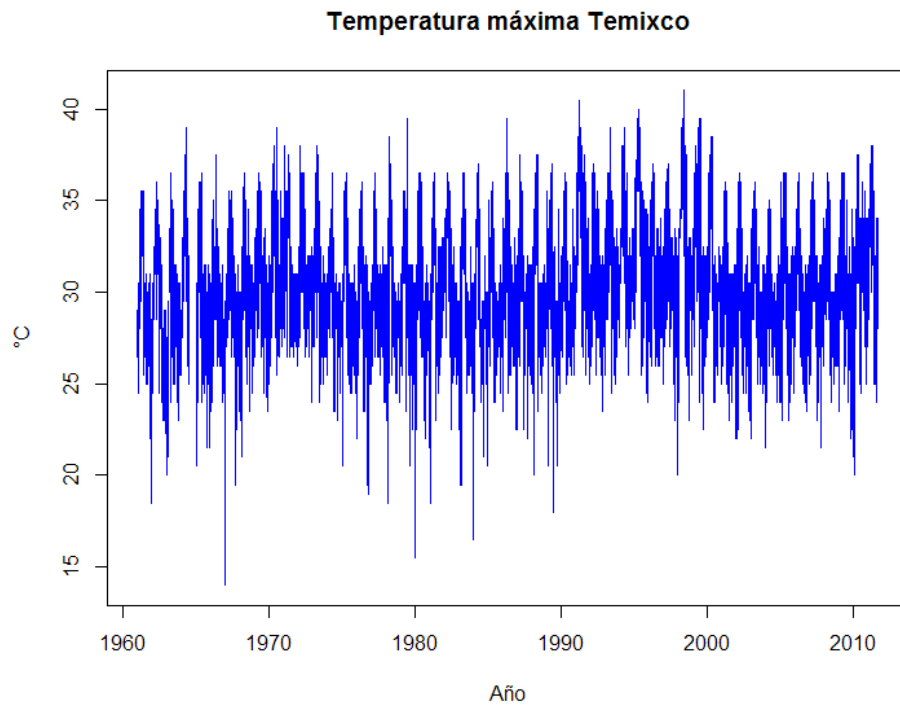


Figura 17. Temperatura máxima histórica en la estación Temixco

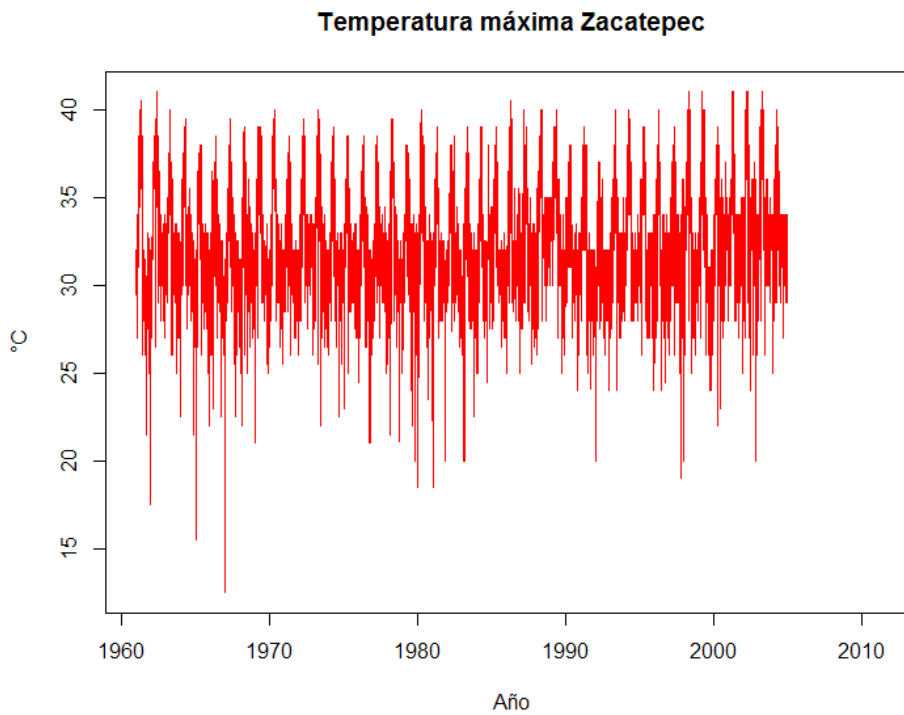


Figura 18. Temperatura máxima histórica en la estación Zacatepec

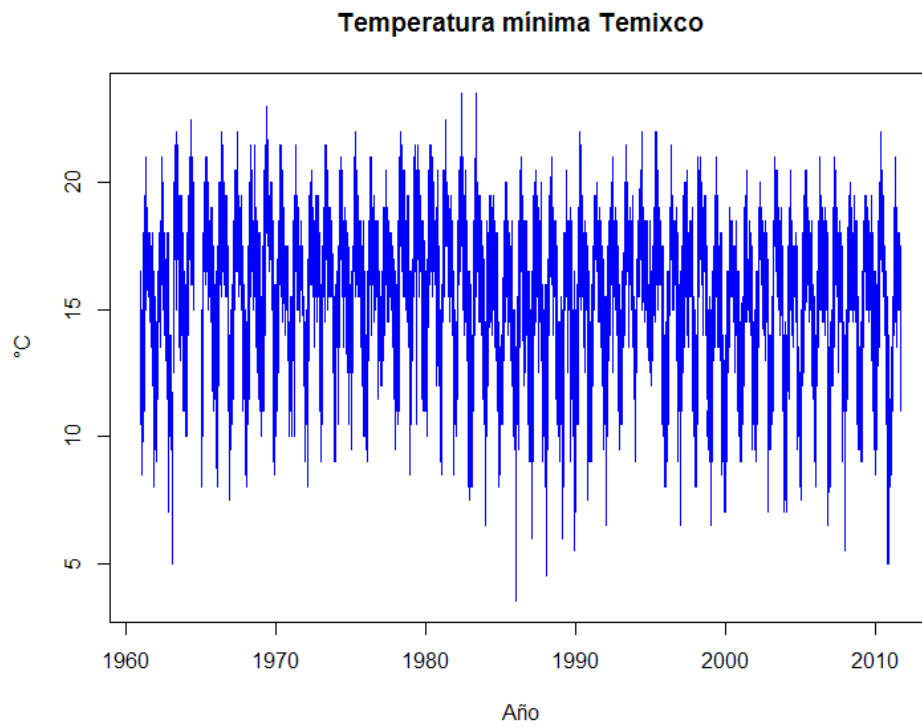


Figura 19. Temperatura mínima histórica en la estación Temixco

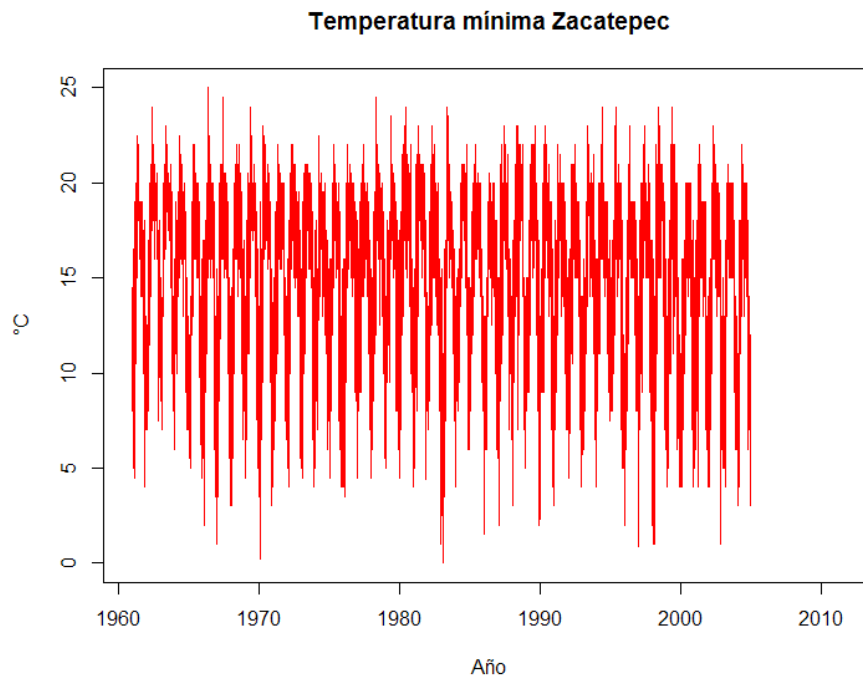


Figura 20. Temperatura mínima histórica en la estación Zacatepec

Análisis de las series de datos mensuales:

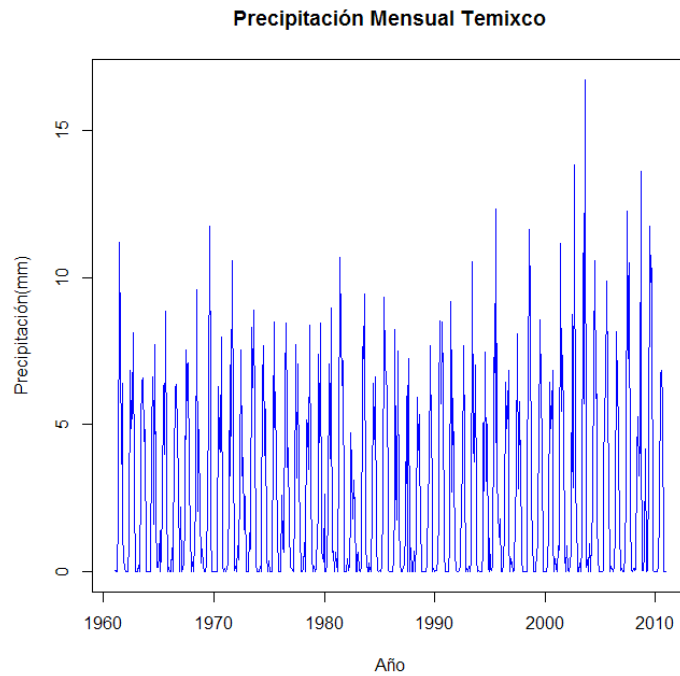


Figura 21. Precipitación mensual para la estación Temixco

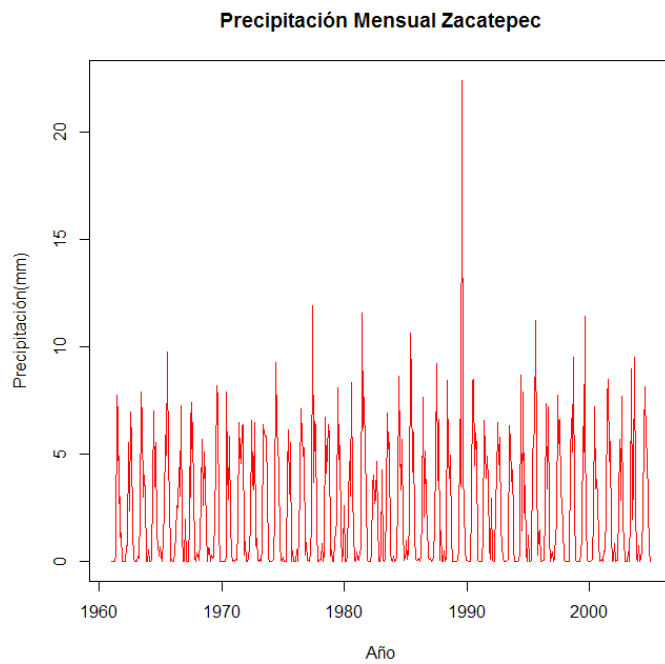


Figura 22. Precipitación mensual para la estación Zacatepec

Descomposición de las series mensuales de precipitación

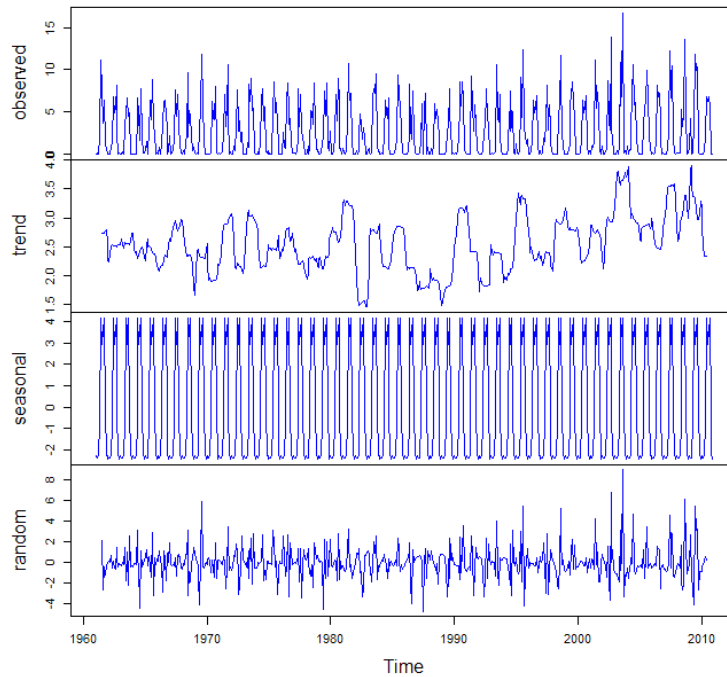


Figura 23. Descomposición de series mensuales para la estación Zacatepec

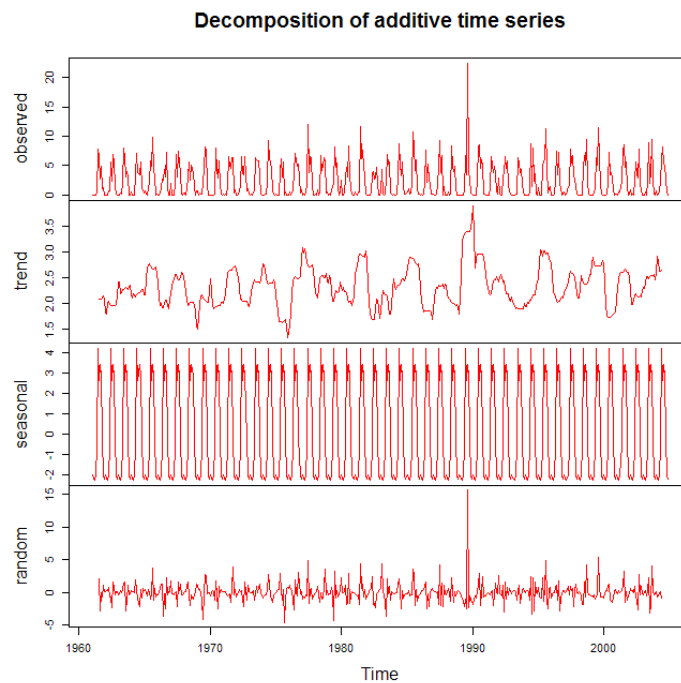


Figura 24. Descomposición de series mensuales para la estación Zacatepec

5.7 Aplicación de la NMX de caudal ecológico

Según los lineamientos establecidos en la NMX de Caudal ecológico se calcularon las siguientes recomendaciones para las estaciones de Temixco y Zacatepec.

Procedimiento a seguir:

1. Selección del sitio de estudio.
2. Selección de la serie de datos.
3. Determinación del régimen de caudal ecológico mensual y anual.
4. Formulación de propuestas de régimen de caudal ecológico mensual y anual.

Sitio de análisis:

EH Temixco

Serie de datos:

Para la cuenca se obtendrán los caudales originales o naturales medios diarios de cuando menos 20 años de información hidrométrica continua, a partir de la información registrada en las estaciones de hidrométricas.

La E.H. Temixco cuenta con una serie de datos de 50 años de registro, que van desde el año 1957 hasta el año 2006.

Promedios mensuales y coeficientes de variación en m³/s

Mes	Promedios (Qmi)	Coef. De Var.
Enero	1.381	0.3067
Febrero	1.213	0.2879
Marzo	1.008	0.2753
Abril	0.864	0.3053
Mayo	0.9869	0.3593
Junio	3.033	0.551

Julio	3.767	0.4523
Agosto	4.374	0.5309
Septiembre	5.44	0.5104
Octubre	3.109	0.627
Noviembre	1.744	0.3943
Diciembre	1.449	0.2333
Caudal o Esgurrimento Medio Anual		2.37 m³/s

Determinación de los periodos de estiaje y avenidas.

Para la determinación de periodos de estiaje y avenida dentro de años secos, medios y húmedos, todos los valores de caudales medios mensuales (Qmi) que se encuentren por encima del valor del Esgurrimento Medio Anual (EMA), se considera periodo de avenida.

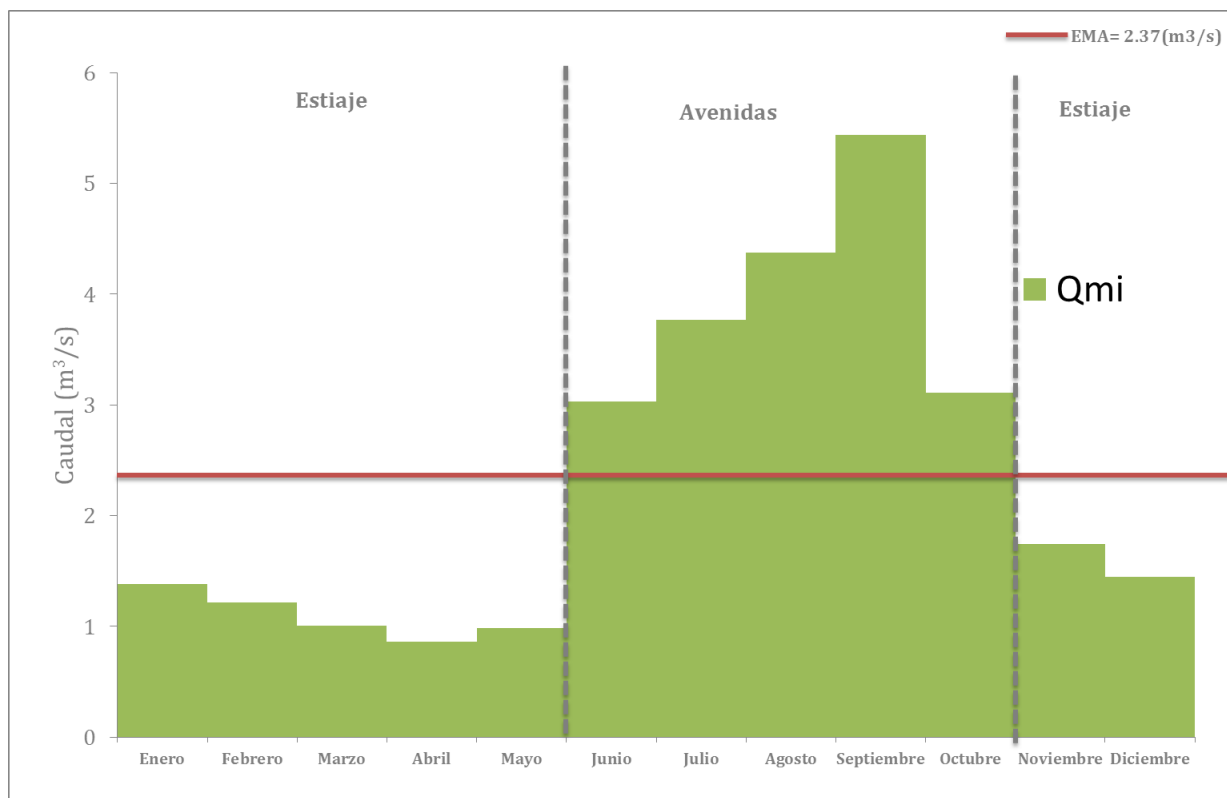


Figura 25. Determinación de periodos de estiaje y avenidas para el año medio

Formulación de propuestas de régimen de caudal ecológico mensual y anual para un año tipo y un objetivo ambiental asociado.

El régimen de caudal ecológico mensual se determina a partir del año medio con los porcentajes de propuestos para la determinación de régimen de caudal ecológico mensual % Qmi de cada periodo dentro del año, conforme a la Tabla 4 para un objetivo ambiental seleccionado.

Según la NORMA MEXICANA NMX-AA-159-SCFI-2012, “QUE ESTABLECE EL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN CUENCAS HIDROLÓGICAS” A esta región le corresponde un objetivo ambiental tipo C, ya que se califica con una importancia ambiental muy alta, presión de uso muy alta y un estado de conservación deseado o esperado Moderado.

Para efectos de estos cálculos se recomienda construir un año medio, calculado a partir de los promedios mensuales para calcular el Caudal ecológico.

Una vez obtenido el año medio se dispone a calcular los porcentajes de Qmi y EMA según la siguiente tabla y de acuerdo con el objetivo ambiental correspondiente.

Tabla 4. Recomendaciones de porcentaje de caudales con objetivos ambientales relacionados (Tennant, 1976), modificado por Garcia et al. 1999 y propuesto por CONAGUA, 2011

Objetivo ambiental	Periodo			
	Estiaje		Avenida	
	% EMA	% Qmi	% EMA	% Qmi
A	30	100	60	50
B	20	80	40	40
C	15	60	30	30
D	5	40	10	20

Conociendo el objetivo ambiental, se procede a construir el hidrograma del régimen de caudal ecológico con los parámetros mencionados en la Tabla 4, donde para la periodo de estiaje se coloca el 15 % del escurrimiento medio anual (EMA), Figura 26 y el 60 % del caudal medio mensual para cada uno de los meses (Qmi), Figura 27 ; y para el periodo de avenidas se tiene el 30 % del escurrimiento medio anual (EMA), Figura 26 y el 30 % del caudal medio mensual (Qmi), Figura 27.

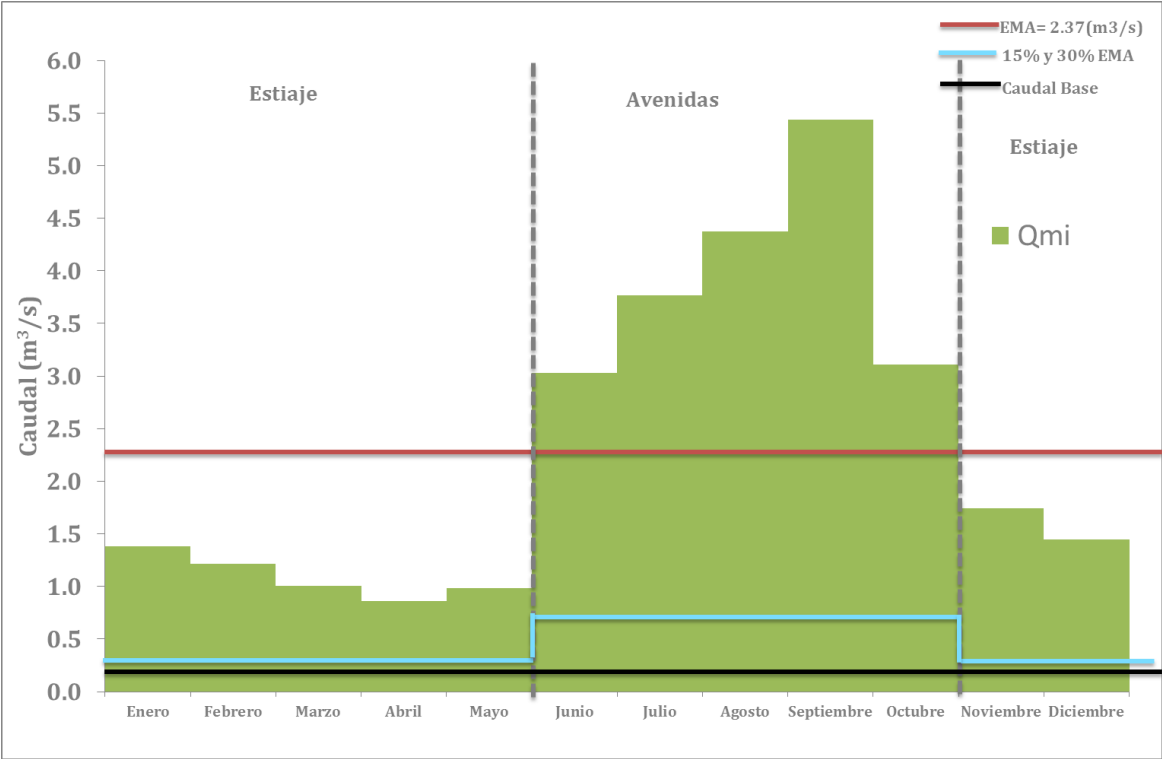


Figura 26. Porcentajes de EMA asignados para estiaje y avenidas según objetivo ambiental C (15% y 30% respectivamente)

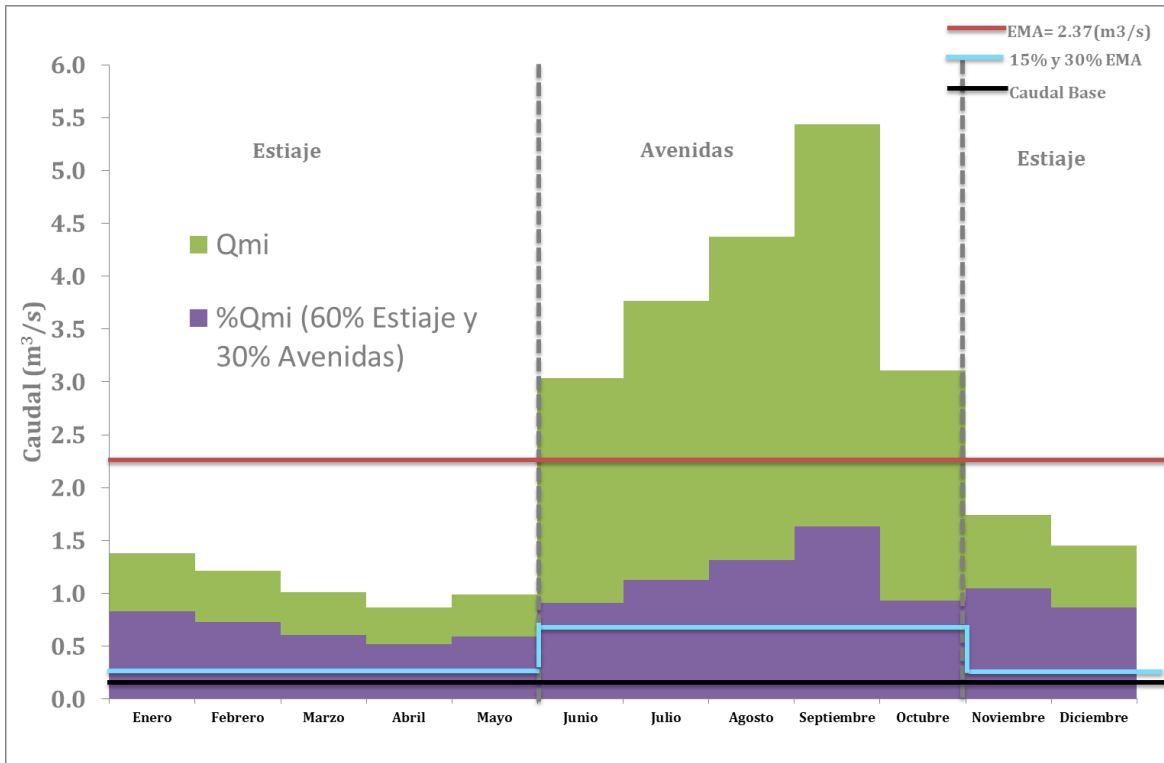


Figura 27. Porcentajes de Qmi asignados para estiaje y avenidas según objetivo ambiental C (60% y 30% respectivamente)

Después de establecer el caudal para los periodos de estiaje y de lluvias, en el periodo de estiaje se elige de entre el 15 % de EMA y el 60 % del Qmi y para el periodo de avenidas se elige entre el 30 % del EMA y el 30 % del Qmi tal como se muestra en la Figura 28

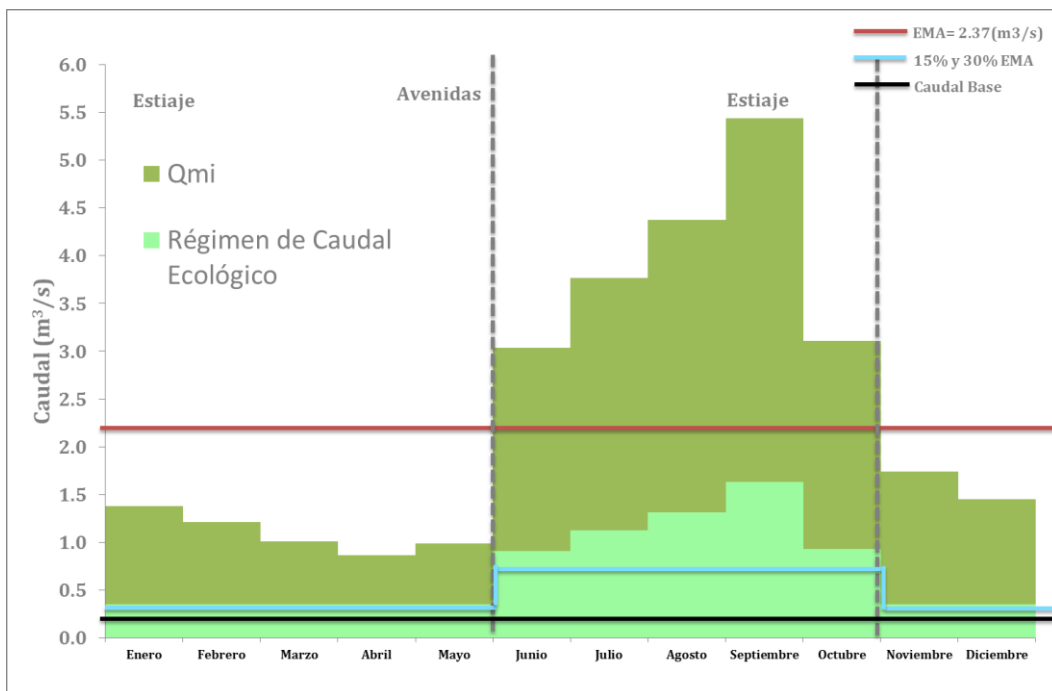


Figura 28. Propuesta de Qecol en términos de Qmi y % EMA para un objetivo ambiental hipotético B, considerando como límite inferior el caudal base.

Tabla 5. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol

Mes	Qmi	% Qmi	% EMA	Cecol
Enero	1.38	0.83	0.36	0.36
Febrero	1.21	0.73	0.36	0.36
Marzo	1.01	0.61	0.36	0.36
Abril	0.86	0.52	0.36	0.36
Mayo	0.99	0.59	0.36	0.36
Junio	3.03	0.91	0.71	0.91
Julio	3.77	1.13	0.71	1.13
Agosto	4.37	1.31	0.71	1.31
Septiembre	5.44	1.63	0.71	1.63
Octubre	3.11	0.93	0.71	0.93
Noviembre	1.74	1.05	0.36	0.36
Diciembre	1.45	0.87	0.36	0.36

5.8 Calidad del agua histórica y actual (análisis de estaciones Conagua y las que trabajaron este año con Conagua)

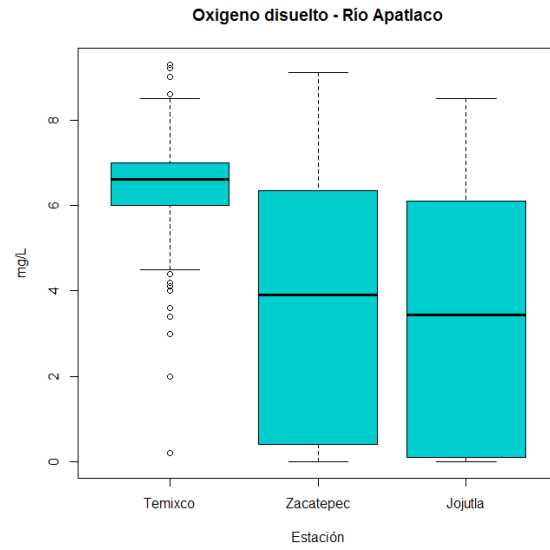
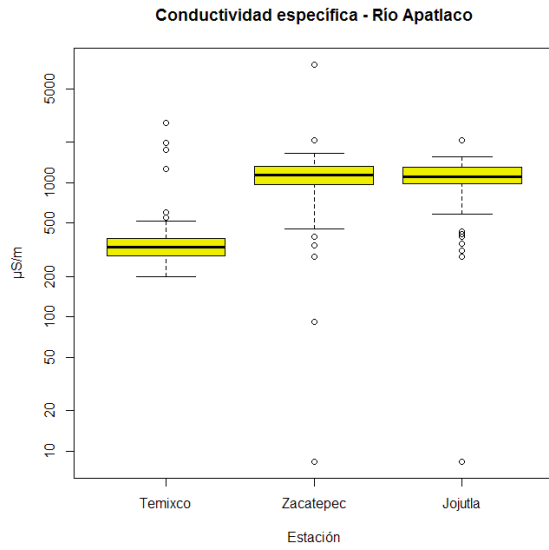


Figura 29 y 30. Conductividad específica y oxígeno disuelto

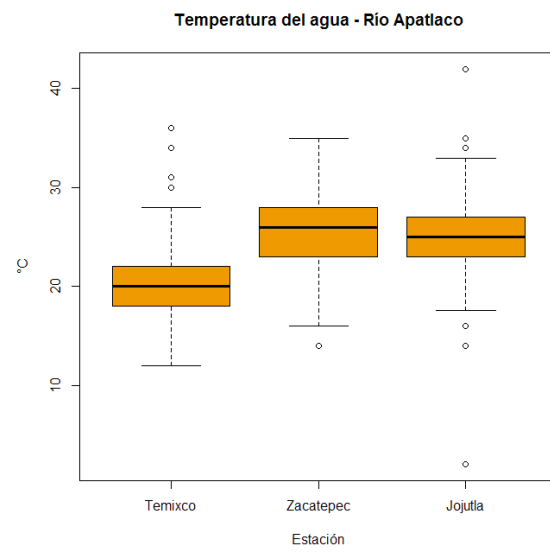
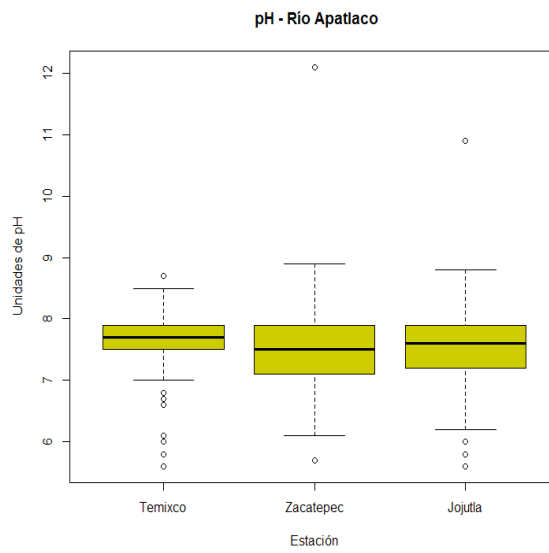


Figura 31 y 32. pH y Temperatura

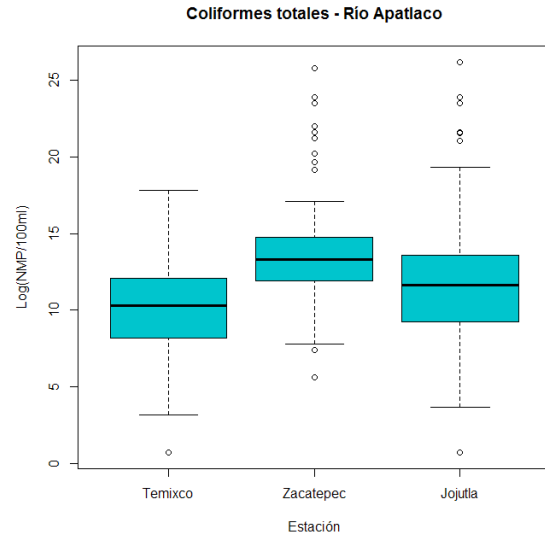
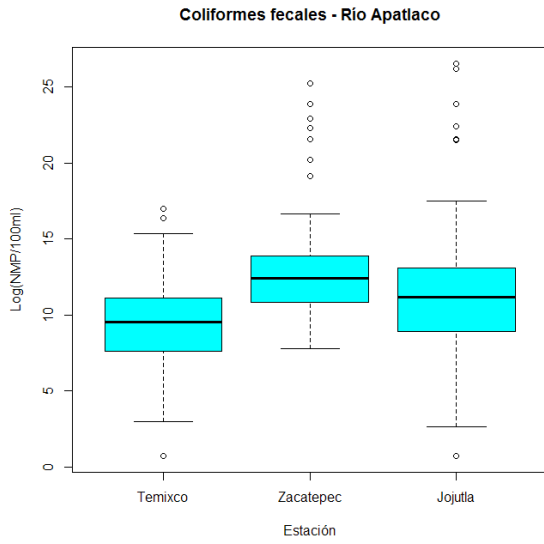


Figura 33 y 34. Coliformes Fecales y Totales

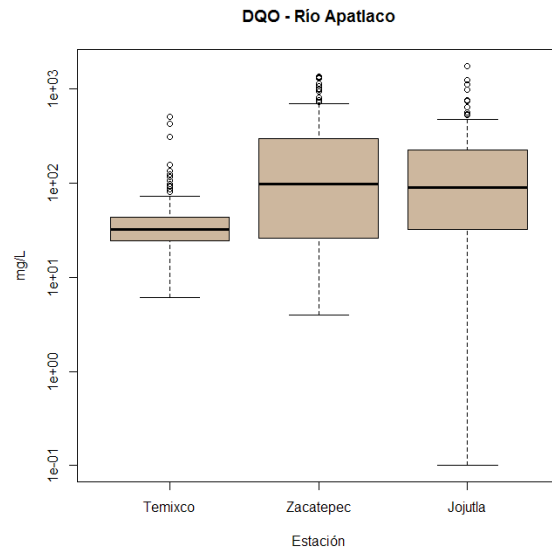
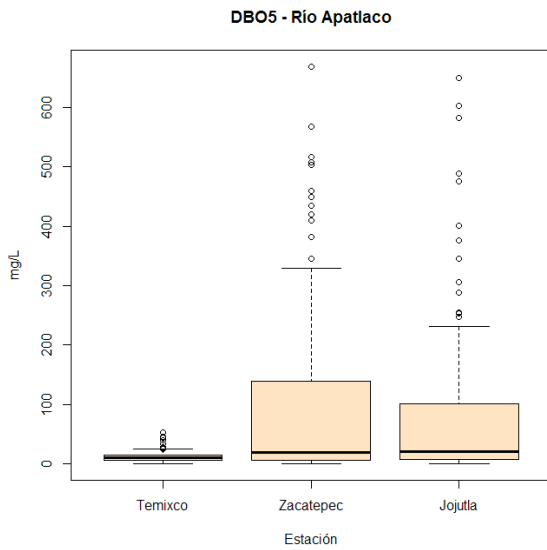


Figura 35 y 36. pH y Temperatura

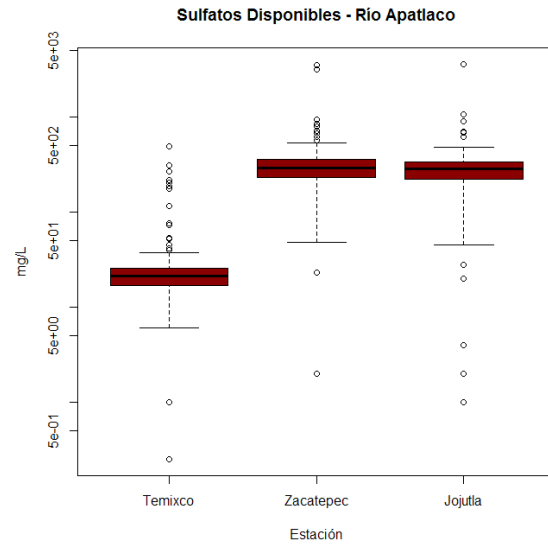
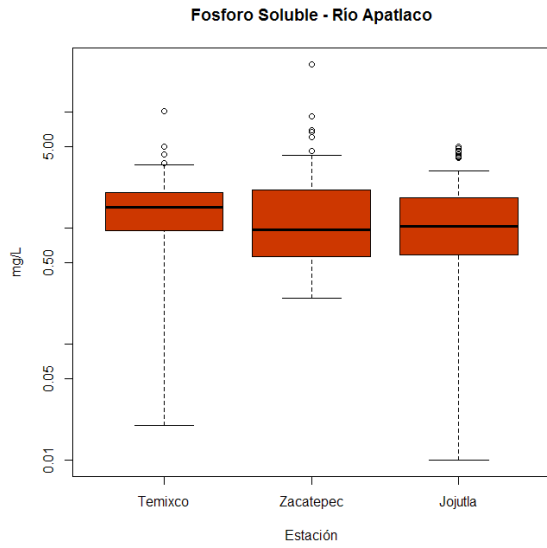


Figura 37 y 38. Fósforo soluble y sulfatos disponibles

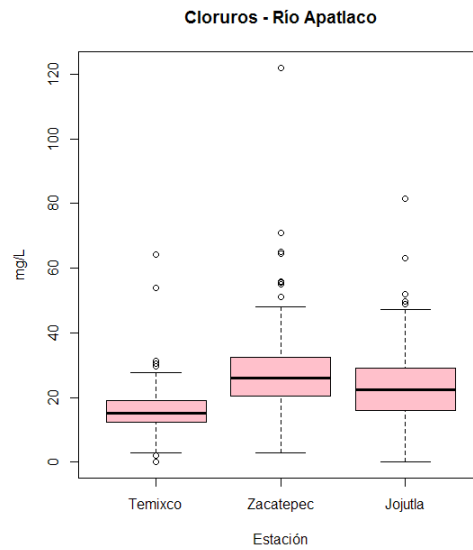
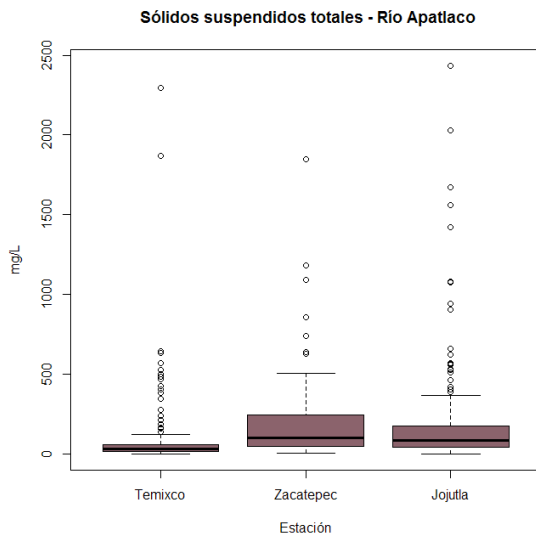


Figura 39 y 40. Sólidos suspendidos totales y cloruros

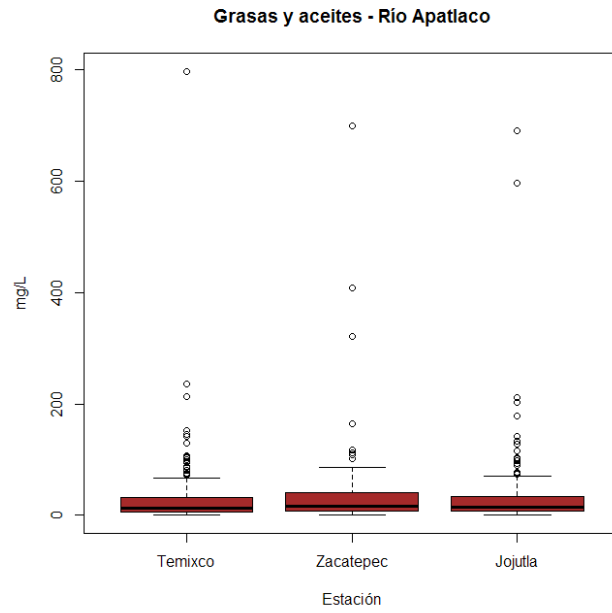


Figura 41. Grasas y Aceites

5.9 Especies acuáticas de interés y su distribución

5.10 Análisis de riesgo ambiental por conservación de especies

Cambio hidrológico vs conservación de especies

6. Conclusiones

7. Referencias

Chandola, V. 2009. Anomaly Detection for Symbolic Sequences and Time Series Data . Ph.D Thesis University of Minesota, USA.

DOF (2007), Diario Oficial de la Federación. 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, 22 de junio de 2007.

Kaiser, H. F., 1958, The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psychometrika, 23, 187-200.

National Climatic Data Center (NCDC). 2010. Global Surface Temperature Anomalies. National Oceanic and Atmospheric Administration. US Department of Commerce <http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>

NMX-AA-159-SCFI-2012 (2012), Norma Mexicana. Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal ecológico en cuencas hidrológicas. México, D.F., 20 de septiembre de 2012.

Richman, M. B., 1987, Rotation of Principal Components: a reply, Journal of Climatology, 7, 511-520.

SEMARNAT. (2010). Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010th ed., p. 105). Mexico, D.F.: SEMARNAT.

Semarnat. 2010. El Cambio Climatico en México Información por Estado y Sector.

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

Wilks, D. S., 2011. Statistical Methods in Atmospheric Sciences, Academic Press. Third Edition. San Diego, 467 pp.

http://www2.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/futuro_slp.html.