



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

**“CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL Y
DETERMINACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO
EN LA CUENCA DEL RÍO VERDE, OAXACA”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

SERGIO RODRÍGUEZ TORRES.

TUTOR:

Dra. MARÍA ANTONIETA GÓMEZ BALANDRA



2012



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida
Secretario:	Dr. Enrique César Valdez
Vocal:	Dra. María Antonieta Gómez Balandra
1er. Suplente:	M. en C. Vicente Fuentes Gea
2do. Suplente:	M. en C. Pedro Alejandro de Jesús Magaña Melgoza

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de ingeniería, Campus Morelos.
Jiutepec, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:
Dra. María Antonieta Gómez Balandra

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios primeramente, por permitirme concluir esta meta propuesta, a él los méritos, porque sin él, nada soy.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría.

A la Facultad de Ingeniería del Campus Morelos, por todo el apoyo otorgado y el conocimiento adquirido.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por las facilidades ofrecidas para realizar esta tesis.

Agradezco de una manera especial a la Dra. Maria Antonieta Gómez Balandra, por todos sus consejos y ayuda; por su entusiasmo, paciencia, ánimo y sobre todo, por contagiarme las ganas de aprender y compartir conmigo sus conocimientos, admiro su compromiso y sabiduría.

Agradezco especialmente a la Dra. Pilar Saldaña Fabela del IMTA, por las facilidades y todo el apoyo brindado para realizar esta tesis.

Al M. en C. Marco Antonio Mijangos Carro, por su ayuda en el manejo y del Sistema de Información Geográfica y creación de mapas, gracias por su invaluable apoyo.

A los miembros del comité tutorial, el Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida y el M. en C. Vicente Fuentes Gea, por sus atentas instrucciones y consejos durante la realización de este trabajo, ha sido un privilegio tenerlos en este comité.

A los miembros del comité ampliado, el Dr. Enrique César Valdez y el M. en C. Pedro Alejandro de Jesús Magaña Melgoza, por aceptar participar en este comité y por sus atentos comentarios y sugerencias.

Contenido:

1. Introducción	1
2. Justificación.....	5
3. Objetivos	6
4. Marco Teórico	7
4.1 Definiciones de caudal ecológico.....	7
4.2 Características de las corrientes naturales	9
4.3 Revisión de métodos	14
4.3.1 Métodos hidrológicos para caudal ambiental.....	14
4.3.2 Método de Tennant o de Montana	15
4.3.3 Método de Tennant modificado para las zonas tropicales de México	16
4.3.4 Metodología IHA - RVA (Indicators of Hydrological Alteration – Range of Variability Approach).....	17
4.3.5 Métodos hidrológicos para evaluación regional	22
4.3.6 Métodos acoplados a un SIG	25
5. Área de estudio	28
5.1 Localización	28
5.2 Descripción de la Cuenca del Río Verde-Atoyac.....	30
5.3 Información hidrométrica.	32
5.4 Subcuencas y disponibilidad de agua del área de estudio	34
5.5 Orografía y geología	35
6. Metodología.....	37
6.1 Componente Espacial: uso del SIG para caracterización regional	38
6.1.1 Análisis de datos geográficos.....	39
6.1.2 Análisis de características físicas	40
6.2 Componente hidrológico: manejo de información hidrométrica.....	42
6.2.1 Recopilación y análisis de la información hidrométrica	43
6.2.2 Manejo y transformación de datos hidrométricos	43
6.2.3 Determinación del régimen de variación natural o de caudal ambiental.....	44
6.3 Componente ambiental: análisis de condiciones ambientales y recursos por proteger.....	49
6.3.1 Importancia ecológica	49
6.3.2 Recursos por proteger	50
6.3.3 Alteración Eco-hidrológica.....	50

6.3.4 Presión de uso	51
6.4 Recomendaciones para establecer una estrategia de caudales ecológicos	52
6.5 Sistema de Información Geográfica (SIG)	53
7. Resultados.....	54
7.1 Características físicas y espaciales de la cuenca	54
7.1.1 Longitud y pendiente de los cauces principales.....	55
7.1.2 Orden de las corrientes	57
7.1.3 Uso de Suelo y Vegetación actuales.	59
7.2 Características hidrológicas de la cuenca.	61
7.2.1 Variación intra-anual.	61
7.2.2 Variación inter- anual	78
7.3 Recursos por proteger y estado de conservación deseado.....	88
7.3.1 Sitios prioritarios para la conservación.....	90
7.3.2 Alteraciones Eco-hidrológicas.....	90
7.3.3 Presión de uso del agua.....	93
7.3.4 Estado actual de conservación deseado	95
7.4 Estrategia de caudales ecológicos	98
7.5 Sistema de Información Geográfica.....	99
8. Discusión de resultados.....	101
9. Conclusiones y recomendaciones.....	107
10. Referencias.....	112

Figuras:

Figura 1. Hidrograma de una inundación. Modificada de Gordon et al., 2004	10
Figura 2. Resumen de la Clasificación de las Metodologías para el soporte de la gestión de caudales ambientales. (Tharme, 2003)	14
Figura 3. Regiones hidrológicas del país	28
Figura 4. Localización de la región hidrológica No. 20 (RH20)	29
Figura 5. Guerrero y Oaxaca, estados de la República que conforman la RH20.....	30
Figura 6. Cuenca Hidrográfica del Río Verde.....	32
Figura 7. Ubicación de las estaciones hidrométricas operadas por la CONAGUA y la CFE.....	33
Figura 8. Modelo digital de elevación de la cuenca del Río Verde.....	36
Figura 9. Diagrama metodológico	38
Figura 10. División por subcuencas o áreas de captación.....	40
Figura 11. Diagrama de flujo que muestra el trabajo que se hace para adaptar los datos al software IHA Versión 7.1.....	44
Figura 12. Sección de resultados para análisis No-Paramétrico IHA.	48
Figura 13. Áreas de influencia o subcuencas.	54
Figura 14. Diagrama unifilar de los ríos principales y estaciones hidrométricas dentro de la cuenca.	55
Figura 15. Orden de las corrientes en el área de estudio.	58
Figura 16. Uso de suelo y vegetación en la cuenca de Río Verde.	59
Figura 17. Porcentajes de los diferentes usos de suelo y vegetación en la cuenca.....	61
Figura 18. Promedios diarios de estaciones hidrométricas ordenadas en forma ascendente.	62
Figura 19. Variación inter-anual para la estación Paso de la Reina.	64
Figura 20. Variación inter-anual para la estación El Carrizo.	64
Figura 21. Variación inter-anual para la estación Ixtayutla.....	65
Figura 22. Variación inter-anual para la estación Nusutia.	65
Figura 23. Variación inter-anual para la estación Yutacua.....	66
Figura 24. Variación inter-anual para la estación Paso Ancho.....	66
Figura 25. Variación inter-anual para la estación Tlapacoyán.	67
Figura 26. Variación inter-anual para la estación Zimatlán.	67
Figura 27. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Atoyac.	68
Figura 28. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Salado.....	68
Figura 29. Variación inter-anual para la estación Yutama.	69
Figura 30. Variación inter-anual para la estación Nduave.	69
Figura 31. Caudales promedio mensuales para la estación Paso de la Reina.....	70
Figura 32. Caudales promedio mensuales para la estación El Carrizo.....	71
Figura 33. Caudales promedio mensuales para la estación Ixtayutla.....	71
Figura 34. Caudales promedio mensuales para la estación Nusutia.....	72
Figura 35. Caudales promedio mensuales para la estación Yutacua.	72
Figura 36. Caudales promedio mensuales para la estación Paso Ancho.	73
Figura 37. Caudales promedio mensuales para la estación Tlapacoyán.....	73
Figura 38. Caudales promedio mensuales para la estación Zimatlán.....	74
Figura 39. Caudales promedio mensuales para la estación Oaxaca-Atoyac.....	74
Figura 40. Caudales promedio mensuales para la estación Oaxaca-Salado.	75
Figura 41. Caudales promedio mensuales para la estación Yutama.....	75
Figura 42. Caudales promedio mensuales para la estación Nduave.....	76

Figura 43. Variación inter-anual para la estación Paso de la Reina.	78
Figura 44. Variación inter-anual para la estación El Carrizo	79
Figura 45. Variación inter-anual para la estación Ixtayutla.....	79
Figura 46. Variación inter-anual para la estación Nusutia.	80
Figura 47. Variación inter-anual para la estación Yutacua.....	80
Figura 48. Variación inter-anual para la estación Paso Ancho.....	81
Figura 49. Variación inter-anual para la estación Tlapacoyán.	81
Figura 50. Variación inter-anual para las estaciones restantes.	82
Figura 51. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Atoyac	82
Figura 52. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Salado.....	83
Figura 53. Variación inter-anual para la estación Yutama.	83
Figura 54. Variación inter-anual para la estación Nduave.	84
Figura 55. Umbrales mensuales que muestran la variabilidad natural recomendada por (Richter et al., 1997).....	86
Figura 56. Sitios prioritarios para la conservación. (CONABIO - CONANP, 2010)	90
Figura 57. Alteraciones Eco-hidrológicas de las cuencas de México, modificada de Cotler-Ávalos, 2010.....	92
Figura 58. Presión hídrica y crecimiento poblacional en las cuencas de México, modificada de Cotler-Ávalos, 2010.	94
Figura 59. Objetivo ambiental para cada una de las subcuencas del área de estudio.	97
Figura 60. Estructura del SIG	100

Tablas:

Tabla 1. Relación de estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Verde	33
Tabla 2. Estaciones hidrométricas y sus periodos de información recopilada.	34
Tabla 3. Disponibilidad de las cuencas que conforman la cuenca del Río Verde *Clasificación según Acuerdo de disponibilidad del DOF 19/06/07.....	35
Tabla 4. Parámetros IHA y su influencia en el ecosistema (TNC, 2009).....	45
Tabla 5. Áreas de subcuencas.	55
Tabla 6. Longitudes y pendientes de los cauces principales.....	57
Tabla 7. Orden de las corrientes principales.....	58
Tabla 8. Tipo de vegetación y porcentaje cobertura en toda la cuenca	60
Tabla 9. Caudal medio anual y valores máximos y mínimos.....	63
Tabla 10. Caudales mensuales del grupo 1	77
Tabla 11. Parámetros hidrológicos del grupo 2	85
Tabla 12. Percentiles 25% y 75% que definen el Intervalo de Variabilidad Natural.	87
Tabla 13. Especies de peces y langostinos de importancia ecológica.....	89
Tabla 14. Clasificación en términos de importancia ecológica y presión de uso por el agua. (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011).....	96
Tabla 15. Aplicación de la Norma de Caudal para la E.H Paso de la Reina (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011)	98
Tabla 16. Valores umbrales de dos estaciones: Paso de la Reina y El Carrizo, para la estrategia de caudales Ecológicos.....	99

Resumen

A nivel nacional e internacional se reconoce la urgente necesidad de mantener los ríos saludables con regímenes naturales de caudal ya que estos se asocian a un gran número de procesos y servicios eco-sistémicos que ofrecen los ríos. El objetivo de este trabajo fue el de integrar elementos espaciales, hidrológicos y ambientales de la cuenca del Río Verde, Oaxaca, para identificar los umbrales de variabilidad de caudales ecológicos que puedan asignarse mensual o estacionalmente a las corrientes de la cuenca, bajo esquemas de aprovechamiento o presión por el agua para conservar la funcionalidad y conectividad de los ecosistemas acuáticos y rivereños. Se integró un Sistema de Información Geográfico (GIS) con información espacial tal como las áreas de la subcuencas que delimitan la cuenca del Río Verde en 18,366 km², la longitud, pendientes y orden de cada una, correspondiendo a la cuenca respectivamente 240 km, 1.04 % y de 5º orden. Se aplicó la metodología hidrológica de TNC IHA: RVN para establecer los umbrales de variabilidad de los caudales en 12 estaciones hidrométricas de la Conagua y CFE con datos de 15 a 30 años de registro. Tanto del análisis intra-anual como histórico inter-anual, se definieron los máximos y mínimos mensuales y estacionales; reconociéndose el comportamiento de años secos, medios y húmedos. Para justificar y asociar las estrategias de caudales ecológicos, se identificaron recursos por proteger, tales como: 18 especies de peces y 7 de langostinos identificadas recientemente en la parte baja de la cuenca. Asimismo, dentro de la cuenca, se definieron las regiones con distintos nivel de alteración eco-hidrológica predominando el nivel medio (con baja presión de uso), así como los sitios prioritarios para la conservación, los cuales se ubicaron principalmente en la desembocadura y en el sistema lagunar asociado. La herramienta desarrollada en este trabajo puede servir de base para la consulta y para el balance entre el aprovechamiento y conservación del agua en la cuenca.

Abstract

Nationally and internationally it is recognized the urgent need to maintain healthy rivers with natural flow regimes since these are associated with a large number of natural processes and eco-systemic services offered by the rivers. The main objective of this study was to integrate spatial, hydrological and environmental elements of the Verde River Basin in Oaxaca, Mexico, to identify thresholds of environmental flow variability that can be assigned monthly or seasonally to their streams under exploitation or water pressure schemes, to maintain the functionality and connectivity of aquatic and riparian ecosystems. A GIS was integrated with physical information such as the sub-basins areas that account for a total basin of 18.366 km². For each stream its length, slope and order was estimated, corresponding to the Verde River basin 240 km, 1.04 % and 5th order, respectively. The hydrological methodology IHA: RVN developed by TNC, was applied to establish flows variability thresholds in 12 hydrometric gauges from Conagua and CFE, using data records from 15 to 30 years. Both, intra-annual and historical inter-annual analysis defined the monthly and seasonal minimum and maximum thresholds during dry, medium and rainy years. To justify and associated the instream flow suggested strategies some resources to be protected were identified, such as 18 fish species and 7 crayfish species recently identified in the last part of the basin (60 km before its sea mouth). Besides, different levels of eco-hydrological alteration were defined within the basin, being the medium condition the most common (with low water use pressure). The priority conservation sites were more abundant in the sea mouth and lagoon system associated to the river. The tool developed in this research can serve as a basis for consultation and for the balance between water use and conservation in the basin.

1. Introducción

Se reconoce que el régimen natural de variabilidad de un río o bien su caudal ambiental, representa la cantidad y duración de los flujos de agua necesaria para mantener las especies y asegurar, tanto las funciones y capacidad de recuperación de los ecosistemas de agua dulce, como los medios de subsistencia de las comunidades humanas que dependen de ecosistemas saludables (Poff et al., 2010) (Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, 2003) (TNC, 2011) (Brisbane, 2007).

Inicialmente, el concepto de caudal ecológico se consideró para autorizar infraestructura hidráulica o extracciones, como el gasto mínimo (en muchos casos 10%) que podría dejarse a la corriente, con base en porcentajes del caudal medio anual (Tennant, 1976). Más adelante, utilizaron porcentajes del caudal medio mensual para reproducir las variaciones estacionales (García, González, Martínez, Athalía, & Paz-Soldán, 1999).

Con el avance en los estudios de este tema, se reconoce que mantener el régimen natural o caudales ambientales en ríos, humedales y zonas costeras, ayuda a que los ecosistemas permanezcan saludables, conectados y se conserven los beneficios para las personas (www.eflownet.org, 2012).

A nivel mundial, los problemas de disponibilidad de agua de buena calidad, han aumentado a medida que las ciudades, industrias, la agricultura y generadores de energía, compiten por fuentes limitadas de abastecimiento

de agua dulce y se han agotado fuentes de agua subterránea. Al mismo tiempo, existe una creciente conciencia de la necesidad de mantener el régimen de caudales en ríos, que se relacionan con la variabilidad hidrológica temporal en lagos, llanuras de inundación, estuarios y acuíferos a largo plazo para sustentar la biodiversidad y los beneficios que se derivan de ecosistemas sanos, inter-conectados y funcionales. (Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, 2003).

Se pueden llevar a cabo estudios a nivel regional para determinar las necesidades de caudal ambiental, en casos en los que no se pueden realizar estudios detallados para todos los ríos de una región. Se puede hacer uso de conocimientos sobre las relaciones entre caudal y ecología, que se han adquirido a través de décadas de estudios de ríos específicos y aplicar dichos conocimientos a zonas geográficas tan grandes como un estado, una provincia, una subcuenca o una cuenca hidrológica. (ELOHA, 2010), (Veza, Parasiewicz, Rosso, & Comoglio, 2011).

Sintetizando bases de datos hidrológicos y ecológicos de los ríos dentro de una región, se pueden generar relaciones entre alteración de caudales y respuestas ecológicas de ríos con diferentes tipos de regímenes hidrológicos. Estas relaciones correlacionan medidas de condición ecológica, que pueden resultar difíciles de manejar directamente, con condiciones de caudales fluviales, que se pueden manejar mediante estrategias y políticas de uso del agua. No es necesario obtener información hidrológica y biológica detallada para cada río de forma individual. (Poff et al., 2010) (Sanderson et al., 2011).

A escala regional, el cambio de uso del suelo, también impacta la dinámica hidrológica de la cuenca. La conversión de tierras para la agricultura, minería, industria o usos residenciales, alteran significativamente las características hidrológicas de la superficie y modifican las rutas y las tasas de escurrimiento (Bhaduri, Harbor, Engel, & Grove, 2008). Si este tipo de cambios, importantes en el balance hidrológico, se producen en áreas grandes o críticas de una cuenca o región, pueden tener efectos importantes a corto y largo plazos, como son: inundaciones aguas abajo, disminución de suministro de aguas subterráneas, reducción de humedales, producción de corrientes intermitentes o ríos secos durante los períodos de estiaje, entre otros, (Mitsch & Gosselink., 1993). En las zonas urbanizadas, los impactos de estos cambios aumentan el volumen de agua por el rápido escurrimiento de las superficies impermeables y sistemas de drenaje, lo que aumenta las inundaciones, degrada la calidad del agua y agrava los problemas de abastecimiento de agua (Schueler, 1994).

Haciendo uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se pueden representar conjuntos de información útil para gestionar, analizar y visualizar información para un estudio a nivel de cuenca o a nivel regional. Los conjuntos de información son datos geográficos topográficos, de uso de suelo, áreas, pendientes, perímetro, longitudes de las corrientes, entre otros; estos conjuntos de información nos permiten conocer mejor las características de la cuenca o zona de estudio (Salinas-Rodríguez, 2009).

La conservación, restauración y manejo del recurso hídrico, requiere de conocimientos de las relaciones funcionales de los ríos y los principales componentes de los suelos, la elevación y vegetación, así como del clima, la fauna, y las intervenciones humanas. Un SIG puede representar espacialmente todos estos componentes, almacenar datos, analizar, recuperar la información, actualizar, consultar, ordenar, mostrar y ser usado para determinar los patrones y las relaciones entre cada uno de los componentes antes mencionados en la toma de decisiones (Lowry, 2006).

En este estudio, se integran los componentes: espacial; a nivel de cuenca, hidrológico; usando puntos de control con estaciones hidrométricas para establecer el caudal ambiental y volumen necesario para conservación; identificando zonas de importancia ecológica, con distinto grado de alteración hidrológica y presión de uso. También, resulta importante la referencia del cambio histórico del uso de suelo actual y la información disponible sobre las comunidades acuáticas y riparias reconocidas.

En este trabajo, se caracterizó el régimen natural del caudal en 12 sitios dentro de la cuenca del Río Verde y se establecieron los intervalos y umbrales de variación que permiten conservar la funcionalidad del río y proponer una estrategia de caudales ecológicos, como señala la normatividad y bajo condiciones de competencia por el uso del agua, para la cuenca del Río Verde, Oaxaca, que ayudará a su manejo y conservación.

2. Justificación

A nivel nacional e internacional, se reconoce la urgente necesidad de mantener los ríos saludables con regímenes naturales de caudal, que al mismo tiempo cubran las necesidades de los distintos usos por medio de un manejo que reconozca los umbrales de los componentes de caudal ambiental (por ejemplo límites mensuales o estacionales) ya que el régimen de caudales se considera la variable maestra asociada a un gran número de procesos naturales que se desarrollan en los ríos.

Actualmente existen herramientas como son: bases de datos, sistemas de información geográfica, software de aplicación ambiental, que usados en conjunto, pueden aplicarse como una herramienta integral que ayuda a comprender el comportamiento de los ríos y a proporcionar una mejor perspectiva de cómo es y debe conservarse el régimen de caudal para mantener la funcionalidad de los ríos.

Este trabajo integra estos elementos para caracterizar y determinar el régimen de variación natural en la cuenca del Río Verde, a fin de definir los umbrales para el caudal ecológico bajo esquemas de aprovechamiento, que permita conservar el sistema.

3. Objetivos

Caracterizar el régimen de caudal ambiental en la cuenca del Río Verde, en el estado de Oaxaca, utilizando herramientas de bases de datos, sistemas de información geográfica y el software IHA 7.1 (Indicadores de Alteración Hidrológica).

Establecer los intervalos y umbrales de variación de los componentes ambientales del régimen de caudal ambiental, que permitan conservar la funcionalidad del río a ser considerados para establecer caudales ecológicos.

4. Marco Teórico

4.1 Definiciones de caudal ecológico

En un principio se considero el término de caudal ecológico de una manera técnico-normativa, para autorizar infraestructura hidráulica o para extracciones de agua de los ríos y se le consideró como un gasto mínimo que podía dejarse a la corriente (Tennant, 1976). Debido al avance en estudios sobre el caudal y a que se han reconocido las influencias que este tiene sobre los ecosistemas, el término ha evolucionado a lo que ahora se conoce como caudal ambiental.

Los caudales ambientales se refieren al agua de un río, humedal o zona costera disponible para mantener los ecosistemas y los beneficios para las personas. (www.eFlows.org).

Los caudales ambientales, pueden ser definidos como el agua que se libera y se requiere en un sistema fluvial, o se deja correr con un propósito específico para mantener la condición natural y funcional del ecosistema (Richter, 2006).

De acuerdo con la declaración de Brisbane, los caudales ambientales, incluyen la cantidad, periodicidad y calidad del agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarios y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas (Brisbane, 2007).

Los caudales ambientales representan la calidad, cantidad y duración de los flujos de agua necesaria para mantener las especies, funciones y capacidad de recuperación de los ecosistemas de agua dulce y los medios de subsistencia de las comunidades humanas que dependen de ecosistemas saludables. (ELOHA, 2010) (TNC, 2011).

La normatividad mexicana, establece que el caudal ecológico se refiere a la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales. Para los fines de esta norma, el caudal y flujo ambiental se consideran sinónimos de caudal ecológico. (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011, 2012).

En México, el caudal ambiental está inscrito en la Ley de Aguas Nacionales como el "Uso Ambiental" o "Uso para conservación ecológica" y se define como el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema. Esta Ley señala que se negarán las concesiones cuando se afecte el caudal mínimo ecológico, que forma parte del uso ambiental.

Para estimar el caudal ambiental o ecológico, se analizan las series históricas de datos hidrométricos, considerando las variaciones intra-anales y por

periodos de registro para distinguir variaciones inter-anales y frecuencia de años secos, promedio o lluviosos.

4.2 Características de las corrientes naturales

Los ríos como tales, ofrecen una variedad de beneficios, pero también hay que considerar que los ríos, al formar parte de procesos en los cuales el hombre afecta su funcionamiento natural, llegan a “enfermarse” y al igual que las personas, hay que saber qué nivel o tipo de enfermedad padece para así lograr una vida más larga y evitar que los beneficios que otorga el río, cesen, al perderlo parcial o completamente.

Conocer la salud de las corrientes naturales no es muy diferente a los conocimientos que tiene un médico sobre la salud de sus pacientes, se identifican mediante observaciones, preguntas y medidas rutinarias de su patrón de comportamiento (Gordon, McMahon, & Finlayson, 2004)

Por lo anterior, es muy importante reconocer los componentes de los hidrogramas, como las características que representan las condiciones diarias y los ciclos mensuales, anuales y extremos, que determinan el patrón de comportamiento de una corriente (Figura 1).

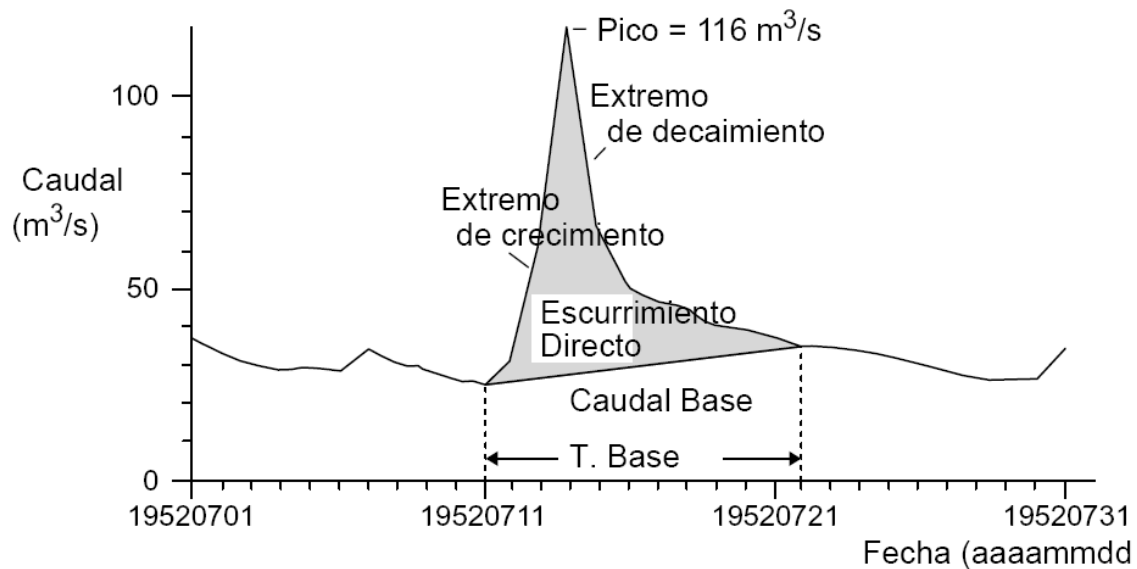


Figura 1. Hidrograma de una inundación. Modificada de Gordon et al., 2004

Un hidrograma se puede separar en dos componentes principales:

1. Escurrecimiento directo - el volumen de agua producido a partir de las lluvias o eventos de deshielo, que presenta un extremo de crecimiento y uno de decaimiento.

2. El Caudal base - el volumen de agua que representa la contribución de las aguas subterráneas. La contribución relativa del escurrecimiento directo y flujo base, variará entre los eventos.

A continuación se describen algunos tipos de estadísticas que pueden ser utilizadas ya que ayudan a conocer el comportamiento de los ríos.

Estadísticas anuales.- Antes de calcular las estadísticas anuales, se debe saber lo que se entiende por «anuales». Los resultados pueden depender de cuál es el mes de inicio elegido (McMahon y Mein, 1986). El año civil es una medición anual bastante estandarizada, y la mayoría de los datos de precipitación se publican en resúmenes de año civil. Sin embargo, en la mayoría de los estudios hidrológicos, es preferible utilizar un intervalo llamado año hidrológico. Esto se define de tal manera que la temporada de inundaciones no se divida en años consecutivos.

Estadísticas mensuales.- Los promedios mensuales, los coeficientes de variación y otras medidas estadísticas de interés para el estudio de las variaciones estacionales en el flujo, son controladas por los patrones climáticos y características del cauce y de la cuenca.

Estadísticas diarias.- Los datos diarios pueden ser analizados para obtener la descarga diaria media de una corriente y el coeficiente de variación (CV) diario. La importancia ambiental de estas variaciones ha sido señalada por autores como (Horwitz, 1978), quien, por ejemplo, ha demostrado una relación entre la estructura de la comunidades de peces y el CV de los caudales diarios.

Un hidrograma medio anual, también se puede desarrollar utilizando datos diarios. Cada punto en el gráfico, representa el valor medio diario, calculado como la media de ese día de todos los años completos de interés.

Por otro lado, las corrientes naturales mantienen una conectividad en cuatro escalas, que son: longitudinal, lateral, vertical y temporal. Conforme con Barraza 2010, algunos aspectos importantes a considerar de esta conectividad, son los siguientes:

Aporte de sedimentos

- Materia orgánica como fuente energética para los manglares que incide en una alta riqueza de especies
- Material para fondo de los manglares

Aporte de agua dulce

- Crea un gradiente de salinidad que permite el desarrollo de la fauna y flora propia de estos ecosistemas

Migraciones (corredores acuáticos)

- Algunas especies como lo son los catádmomos, bajan los ríos hasta el estuario para reproducirse.
- Otras especies estuarinas o marinas remontan los ríos para completar sus ciclos de vida.
- Proveen refugios durante inundaciones.

Bosques de galerías

- Sirven de corredores terrestres para muchas especies

Hábitats especiales

- Pantanos agua dulce, marismas, lagunas costeras.

Además existen implicaciones ecológicas asociadas al régimen hidrológico de la cuenca por su conexión con el sistema lagunar y manglares (LGVS Art. 60Ter) entre las que se encuentran:

Aporte de sedimentos

- Turbidez en aguas estuarinas que regula la distribución de especies.
- Fondos blandos típicos de manglar con capa oxigenada de 5-10 cm que regulan distribución de especies de invertebrados, peces y algas.
- Materia orgánica, nutrientes, que inciden en la productividad de estos ecosistemas.
- Material energético a peces pelágicos oceánicos

Migraciones (corredores acuáticos/terrestres)

- Camarones de agua dulce bajan a liberar larvas
- Peces, camarones marinos utilizan manglares como zonas de crianza o de paso a ríos, incluyendo depredadores que se alimentan en estuarios.
- Microalgas de manglares liberan sustancias que atraen las larvas marinas de los camarones
- Vertebrados terrestres nativos y no nativos transitan en manglares para hábitat, alimentación, reproducción.

Hábitats

- Bivalvos, peces

4.3 Revisión de métodos

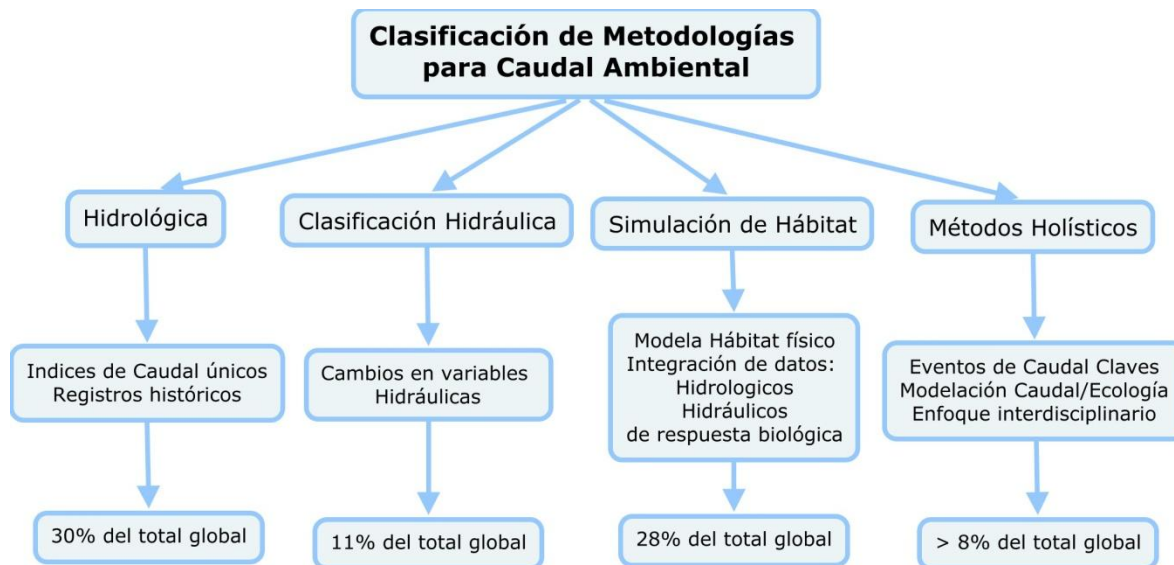


Figura 2. Resumen de la Clasificación de las Metodologías para el soporte de la gestión de caudales ambientales. (Tharme, 2003)

4.3.1 Métodos hidrológicos para caudal ambiental

Este trabajo se enfoca a la aplicación de métodos hidrológicos que son la base para el desarrollo de evaluaciones más detalladas. (Postel & Richter, 2003). Por lo que a continuación se presentan las nuevas tendencias en el desarrollo y aplicación de metodologías hidrológicas de caudales ambientales (Tharme, 2003).

Los métodos hidrológicos, emplean índices de caudales únicos o múltiples (basados en la variabilidad anual o temporal) derivados de registros históricos para fijar objetivos de caudal que ayudan a mantener la integridad biológica y los servicios ecosistémicos. Estos métodos son utilizados en un 30% del total global y aplicado en todas las regiones del mundo.

Son apropiados para propósitos de planeación de recursos hídricos a nivel de sitio o región, además de ser simples, rápidos y económicos. Cuando existe escasez de datos de campo, pueden funcionar y tienen un potencial de regionalización.

Algo que puede afectar el uso de estas metodologías es que cuenta con un enfoque simple y de baja resolución, vínculos ecológicos limitados y la variación natural del régimen de caudales se considera parcialmente. No es apropiado para casos en que debe negociarse la asignación del agua.

Algunos ejemplos de métodos hidrológicos que se usan en la actualidad son los siguientes:

- Método de Tennant o de Montana
- Método de Tennant modificado para las zonas tropicales de México
- Metodología IHA - RVA (Indicators of Hydrological Alteration – Range of Variability Approach)
- Métodos hidrológicos para evaluación regional
- Método ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration)
- Métodos acoplados a un SIG

4.3.2 Método de Tennant o de Montana

Este método fue desarrollado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América, (US Fish and Wildlife Service). Calcula los

caudales con base en los promedios anuales de los registros hidrométricos de por lo menos 10 años anteriores a un impacto sobre el río. Asimismo, considera que la profundidad, la velocidad de la corriente y el ancho del cauce a nivel de la superficie libre del agua son las variables determinantes en el desarrollo de los organismos acuáticos y el buen estado de su hábitat. Asimismo, asume que estos tres parámetros físicos se incrementan al aumentar el caudal y los cambios que experimentan son mayores a caudales bajos. El empleo de gastos fluviales comprendidos entre el 30 y el 60% del gasto medio anual lo considera dentro de los criterios cualitativos para la determinación de los caudales ambientales como bueno y óptimo para el desarrollo de los organismos acuáticos, aunque se adoptó internacionalmente como el método que establecía el 10% como mínimo (Tennant, 1976).

4.3.3 Método de Tennant modificado para las zonas tropicales de México

En esta modificación del método original, los cálculos se basan en los caudales medios mensuales, en lugar del promedio anual, para hacerlos coincidir con la distribución de caudales naturales mensuales durante el año, se calculan los caudales durante los periodos noviembre-mayo (estiaje) y junio-octubre (lluvias) de las zonas tropicales mexicanas, periodos que generalmente presentan ligeras variaciones dependiendo de la región. La época de secas se define para los meses con valores de caudal menores al promedio anual, y la época de lluvias para los meses donde el promedio mensual del caudal es mayor al promedio anual (variación climatológica

estacional trimestral-anual), se sugiere un porcentaje del 20% para los caudales ambientales mensuales mínimos recomendados en lugar del 10%. (García et al., 1999).

4.3.4 Metodología IHA - RVA (Indicators of Hydrological Alteration – Range of Variability Approach)

Esta metodología se ha consolidado al aplicarse en más de 80 casos alrededor del mundo (ConserveOnline, 2011). Dichas 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 en 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, 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 desviación 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)

Estadística Paramétrica y No Paramétrica en la Metodología IHA

Las pruebas paramétricas están basadas en el muestreo de una población de datos con parámetros específicos, como la media (μ), la desviación estándar (σ) o la proporción (p). Estos métodos usualmente tienen que ajustarse a algunas condiciones completamente estrictas, así como el requisito de que los datos de la muestra provengan de una población normalmente distribuida.

Las pruebas no paramétricas no requieren estos supuestos. Por consecuencia, las pruebas no paramétricas o de hipótesis son frecuentemente llamadas pruebas de libre distribución y no tienen los requisitos rígidos de los métodos paramétricos correspondientes. En particular, los métodos no paramétricos no requieren poblaciones normalmente distribuidas. (Avilés-Garay, 2003). De las pruebas no paramétricas se obtienen medianas y cuartiles o percentiles, que pueden asociarse a una frecuencia y probabilidad.

Los cuartiles dividen el conjunto de datos en cuatro partes iguales. Siendo así, el primer cuartil o .25 fractil (Q1) separa la cuarta parte inferior de las tres cuartas partes superiores, esto es, el 25% de las mediciones con los valores menores. El segundo cuartil o .50 fractil (Q2) es idéntico a la mediana o sea que la mitad de las observaciones están debajo de este valor. Las observaciones arriba del tercer cuartil o .75 fractil (Q3) solo dividen la cuarta parte superior del conjunto de datos. (Quevedo-Urías, 2006).

De la misma manera, el conjunto de datos de la muestra se puede dividir en 100 partes iguales por medio de percentiles. Por ejemplo, el 99avo percentil separa el 1% de los valores más altos del 99% restante. Bajo estas condiciones, el 84avo percentil correspondiente al valor de la variable aleatoria z de la distribución normal es, aproximadamente, $z = +1$ y por simetría es $z = -1$ (+- una desviación estándar). (Quevedo-Urías, 2006)

Para calcular los percentiles, el Software IHA Versión 7.1, usa el algoritmo de las bibliotecas internacionales de matemáticas y estadística (International Mathematical and Statistical Libraries — IMSL), (TNC, 2009). Este algoritmo ha sido la base de aplicaciones computacionales científicas por más de tres décadas y es un conjunto integral de funciones matemáticas y estadísticas (rutinas pre-escritas y probadas) que los programadores incluyen en sus aplicaciones de software (Rogue Wave Software, 2012).

IHA utiliza fechas julianas que se asignan a cada día calendario por ejemplo: día juliano: 1 de Enero = día 1,..., 31 de Diciembre = día 365 o 366 juliano si se trata de un año bisiesto. También maneja años hidrológicos los cuales agrupan los periodos de estiaje y lluvias, esto es, no inician en enero como en el año calendario.

Usa un “método circular” para las estadísticas de tiempo, que pone todas las fechas julianas en un conjunto de datos trimestrales para analizar periodos extremos de 30 y 90 días, según la situación y considerando también cuando

se trate de un año bisiesto, los conjuntos de datos trimestrales los agrupa como sigue:

- A) Días 1-91
- B) Días 92-183
- C) Días 184-275
- D) Días 276-366

Los cálculos se llevan a cabo identificando la longitud de los trimestres que van de 90 a 92 datos y haciendo los ajustes necesarios cuando se trate de años bisiestos. Este método produce resultados razonables cuando los periodos de tiempo se agrupan en algún punto del año que se considera el inicio del año hidrológico. El software envía señales de alerta cuando este agrupamiento carece de sentido o tiene una desviación estándar mayor a 180.

4.3.5 Métodos hidrológicos para evaluación regional

Método ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration)

Constituye un nuevo marco que ofrece una solución flexible y científicamente defendible para determinar de manera general, las necesidades de caudal ambiental en casos en los que no se puedan realizar estudios detallados para todos los ríos de una región. El método ELOHA se basa en el cúmulo de conocimientos sobre las relaciones entre caudal y ecología que se han adquirido a través de décadas de estudios de ríos específicos y aplica dicho

conocimiento a zonas geográficas tan grandes como un estado, una provincia, una nación o una gran cuenca hidrológica (ELOHA, 2010).

El método ELOHA sintetiza bases de datos hidrológicos y ecológicos de muchos ríos dentro de una región para generar relaciones entre alteración de caudales y respuestas ecológicas de ríos con diferentes tipos de regímenes hidrológicos. Estas relaciones correlacionan medidas de condición ecológica, que pueden resultar difíciles de manejar directamente, con condiciones de caudales fluviales, que se pueden manejar mediante estrategias y políticas de uso del agua. No es necesario obtener información hidrológica y biológica detallada para cada río de forma individual.

Esta metodología se compone de 7 pasos básicos que se describen a continuación:

1. Construir un fundamento hidrológico, una base de datos regional de hidrogramas fluviales diarios o mensuales que representen las condiciones base (antes del desarrollo) y posteriores al desarrollo para segmentos de un río a lo largo de una región, durante un periodo lo suficientemente largo como para que represente la variabilidad climática.
2. Clasificar los segmentos de ríos con base en la similitud de regímenes de caudal, empleando estadísticas de caudales ecológicamente relevantes computadas partiendo de los hidrogramas fluviales base.

3. Subclasificar cada segmento con base en características geomorfológicas clave que definan rasgos del hábitat físico, tales como ríos sinuosos o ríos de cañón.
4. Calcular la alteración hidrológica de cada tramo de río, expresada como la desviación porcentual de los caudales con condiciones post-desarrollo con respecto a los caudales con condiciones base, utilizando un pequeño conjunto de estadísticas de caudales que estén íntimamente ligadas con las condiciones ecológicas y que sean factibles de ser empleadas como objetivos de gestión del agua.
5. Desarrollar relaciones entre la alteración de caudales y la respuesta ecológica mediante la asociación del grado de alteración hidrológica con los cambios subsecuentes en las condiciones ecológicas. Se elabora un grupo de tales relaciones para cada tipo de río utilizando una variedad de estadísticas de caudales y variables ecológicas.
6. Elaborar objetivos de caudal ambiental utilizando relaciones entre alteración de caudales y respuestas ecológicas para asociar la condición ecológica deseada con el grado correspondiente de alteración de caudales para el tipo de río correspondiente. El grado permisible de alteración de caudal se convierte en el "objetivo" del caudal ambiental.
7. Implantar la gestión de caudales ecológicos mediante la incorporación de objetivos de caudal ambiental en el proceso más amplio de planeación hídrica.

El modelo empleado para construir el fundamento hidrológico es, en esencia, una herramienta regional integral de gestión en la cual se pueden incorporar los objetivos de caudales ambientales. Por tanto, el fundamento hidrológico del método ELOHA afianza las decisiones sobre futuras asignaciones de agua y la gestión fluvial en una completa comprensión de la disponibilidad, ubicación y temporalidad de los caudales necesarios para mantener o restaurar la salud general de los ecosistemas fluviales de una región.

El desarrollo y la implantación de objetivos regionales de caudal ambiental son procesos continuos e iterativos en los que la recolección de datos, el monitoreo, la evaluación y los cambiantes valores sociales constantemente refinan los objetivos y las relaciones entre caudal y ecología sobre las que se basan.

4.3.6 Métodos acoplados a un SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han revolucionado la manera de entender y conocer los fenómenos que tienen lugar en la superficie terrestre. Permiten resolver necesidades concretas de información modelando una parte de la realidad dentro de un espacio geográfico. Por tal motivo han sido empleados en la planificación y gestión de proyectos de prácticamente todos los campos de la actividad humana.

Las posibilidades de un SIG abarcan análisis complejos, simulación de escenarios, configuración de modelos, obtención de mapas, identificación de

tendencias, monitoreo, ubicación y medición de objetos, relación de variables y deducción de sus funciones y características, entre otros (Salinas-Rodríguez, 2009), (Fitzhugh, 2005), (Kabir et al., 2011).

La información geográfica y temática para la creación del SIG puede comprender las siguientes capas:

- Hidrológica de tramos o de cuenca
- Geológica
- Pendientes
- Curvas de nivel
- Isoyetas (precipitación)
- Vegetación y uso del suelo
- Vías de comunicación
- Núcleos de población

Con esta información se puede realizar una clasificación de acuerdo a criterios de riesgo por inundaciones, ensanchamiento de ríos, pérdida de taludes, al tipo de vegetación y uso del suelo contiguo a las márgenes de los ríos, cercanía de las vías de comunicación o núcleos de población.

Información y mapas que pueden ser útiles para el estudio y caracterización a nivel regional:

1) Régimen de caudal histórico, anual y mensual.

2) Geomorfología de los tramos.

3) Arrastre y de sedimentos.

4) Flora y fauna presente o característica de las zonas.

5) Aspectos socioeconómicos, usos del agua y actividades en planicies de inundación, entre otros.

Como resultado final se obtiene un conocimiento y visión más amplia de las características y condiciones en las que se encuentra cada tramo del río o afluentes.

Esta información es útil y puede formar parte de una aplicación donde se pueden consultar las características de los puntos de control establecidos para el estudio, análisis y caracterización de la cuenca o región a conocer.

5. Área de estudio

5.1 Localización

La República Mexicana está dividida en 37 regiones hidrológicas (figura 3), La cuenca del Río verde se encuentra localizada dentro de la Región Hidrológica No. 20 (RH20) “Costa Chica Río Verde”, la cual recibe el nombre por el río más importante dentro de la región, el Río Verde. Los límites de la RH20 son 15°58,5' a los 17°37,5' de latitud Norte y de los 96°16,0' a los 100°7,0' de longitud Oeste (Figura 4).

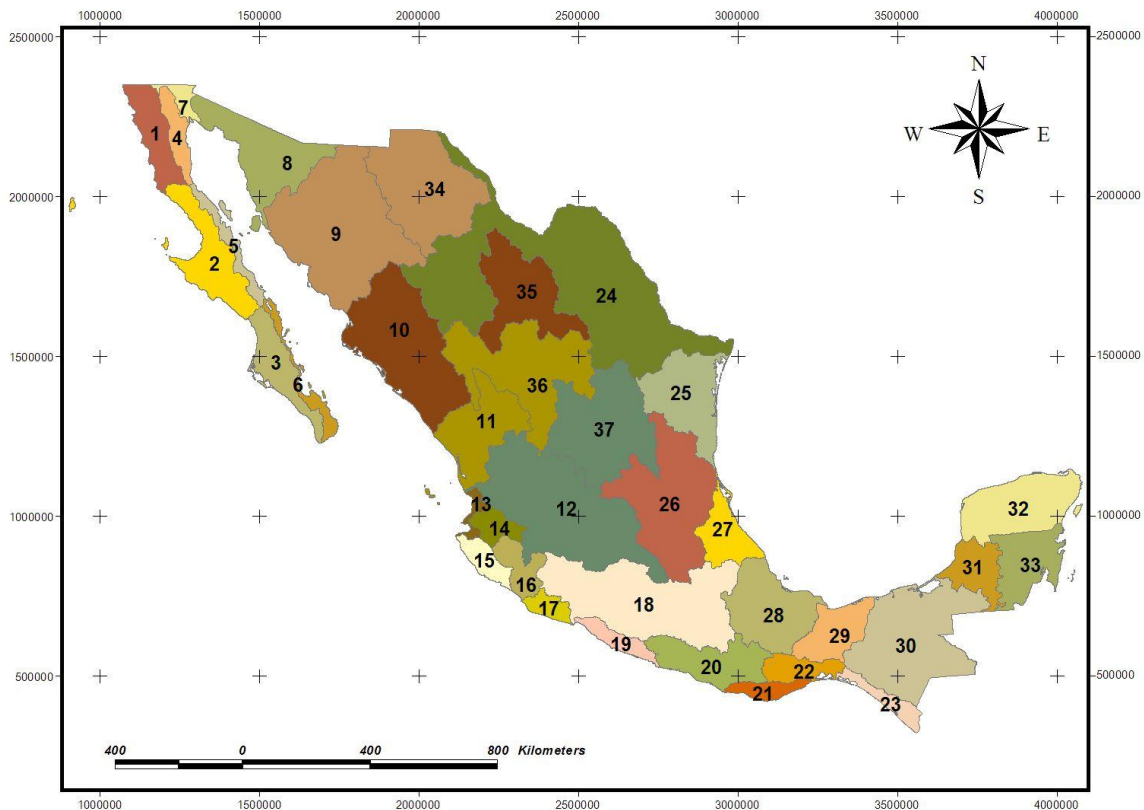


Figura 3. Regiones hidrológicas del país

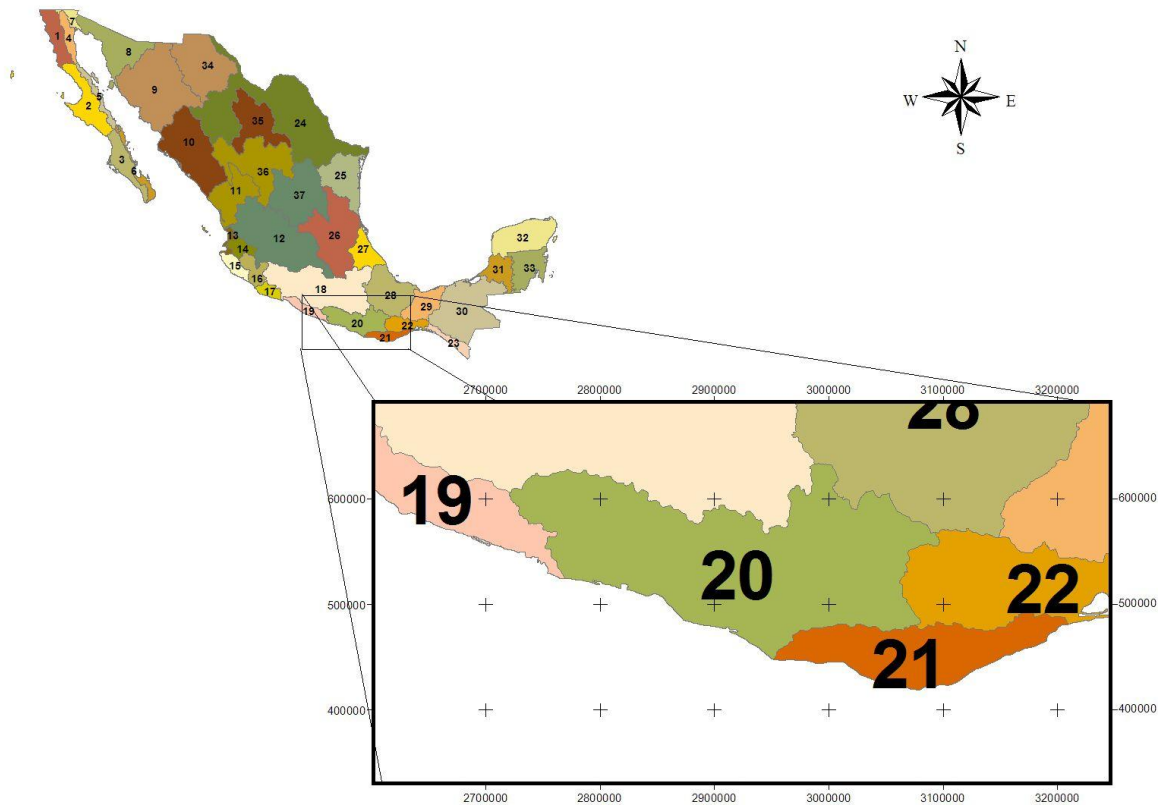


Figura 4. Localización de la región hidrológica No. 20 (RH20)

La porción occidental de la RH20 queda íntegramente dentro del estado de Guerrero y la oriental en el estado de Oaxaca (figura 5). Sus límites son: hacia el Oeste la región hidrológica 19 (cuenca del Río la Sabana); hacia el Norte, en una línea muy sinuosa, cuencas de los ríos Balsas (RH18), Mezcala y Papaloapan (RH28); hacia el oriente, cuenca del Río Tehuantepec (RH22); hacia el sureste, la región hidrológica 21 (RH21); y hacia el Suroeste el Litoral del Océano Pacífico. (CONAGUA, 2011a)

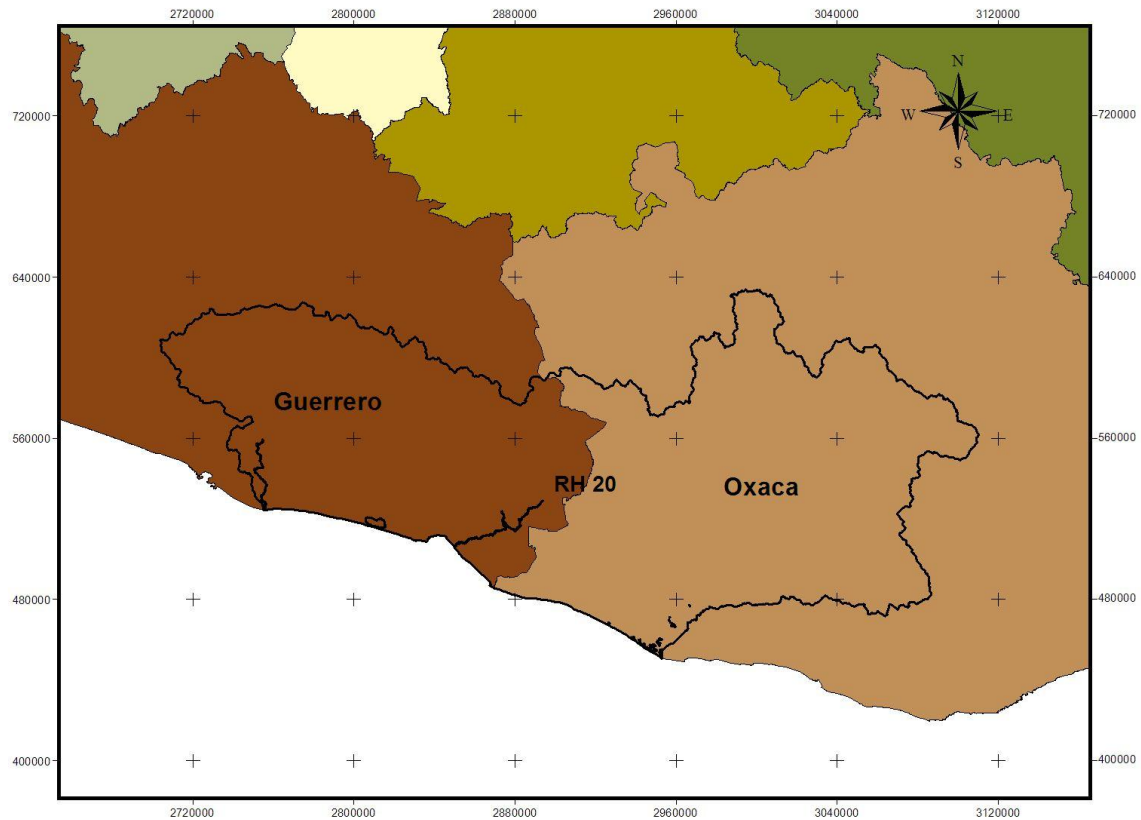


Figura 5. Guerrero y Oaxaca, estados de la República que conforman la RH20.

La región hidrológica número 20, tiene una superficie total de aportación de 40,016.06 kilómetros cuadrados, en donde se localizan diversas corrientes y ríos que desembocan directamente en el Océano Pacífico.

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, 2011a).

5.2 Descripción de la Cuenca del Río Verde-Atoyac

El Río Verde es el más importante de la Región Hidrológica No. 20 desde el punto de vista hidrográfico. La cuenca del Río Verde cuenta con una superficie de aproximadamente 18,345 km². Toda la cuenca está comprendida en el Estado de Oaxaca y quedan dentro de ella la mayor parte de los Distritos de Putla, Tlaxiaco, Teposcolula, Nochistlán, Sola de Vega, Zimatlán, Centro, Ocotlán y Ejutla. Se desarrolla entre 15° 58' y los 17° 37' de latitud Norte y de 96° 14' a 98° 06' de longitud Oeste.

Las cuencas que lo limitan son: al Occidente el Río de La Arena y el Río Ometepec; al Norte el Río Mixteco, cuenca alta del Río Papaloapan y ríos Valle Nacional, Tomellín y Cajones; al Oriente el Río Tehuantepec y al Sur y Sureste los ríos Colotepec, Grande y San Francisco, éstos últimos ya dentro de la Región Hidrológica No. 21. (DOF-19/06/2007)

La distribución de afluentes y subafluentes de esta corriente es sumamente complicada, a causa de las numerosas estribaciones que tienen La Sierra Madre del Sur en cuyo parteaguas, cercano a San Juan Teposcolula, se encuentra la rama más septentrional. El nacimiento del río ocurre en la zona del Valle de Oaxaca, al Noroeste de la Capital del Estado; luego pasa por Huitzo y Oaxaca con una dirección Sur, para continuar después rumbo a Zaachila, Zimatlán, Santa Ana Tlapacoyan, Amatengo y Coatlán. A la altura de Coatlán y debido a la interposición de la Sierra Madre del Sur, hay un brusco cambio de dirección de 90°, que modifica el curso hacia el Occidente, trayecto en el cual el río pasa Juchatengo y llega hasta el municipio de Zenzontepec, donde vuelve a cambiar de dirección hacia el Sur-suroeste y se

ve obligado a seguir una línea sinuosa, de curvas muy cerradas, en busca de su salida al mar a través de un cañón estrecho. Finalmente desemboca en el Pacífico paralelamente a las Lagunas de Chacahua. La longitud de este río es de aproximadamente 342 km y tiene gran número de afluentes por la abundancia de serranías secundarias. Figura 6. (CONAGUA, 2011a) (Gómez-Martínez, 2009)

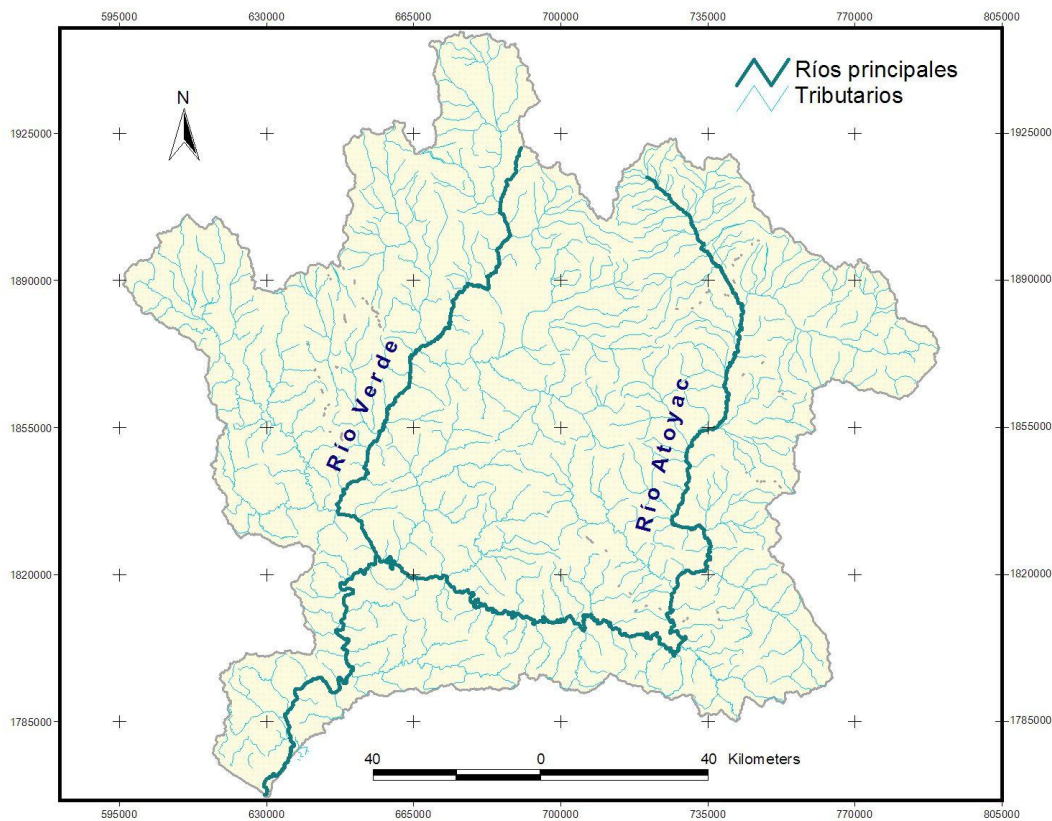


Figura 6. Cuenca Hidrográfica del Río Verde.

5.3 Información hidrométrica.

Con el fin de poder realizar el análisis de la información hidrométrica, se identificaron las estaciones contenidas en el BANDAS (Banco Nacional de Aguas Superficiales) operadas por la CONAGUA, se obtuvo también la información de las estaciones operadas por la CFE. El total de estaciones fue

de trece, que se distribuyen en la cuenca como se muestra en la tabla 1 y figura 7.

Tabla 1. Relación de estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Verde

no	*clave	Nombre	Corriente	Cuenca	Operador	Longitud	Latitud
1	20005	Oaxaca Atoyac	Río Atoyac	Río Verde	CONAGUA	-96° 43' 45"	17° 02' 45"
2	20027	Oaxaca Salado	Río Salado	Río Atoyac	CONAGUA	-96° 42' 35"	17° 01' 40"
3	20023	Zimatlán	Río Atoyac	Río Verde	CONAGUA	-96° 45' 10"	16° 52' 15"
4	20026	Tlapacoyan	Río Atoyac	Río Atoyac	CONAGUA	-96° 50' 00"	16° 43' 50"
5	20036	Paso ancho	Río Atoyac	Río Atoyac	CFE	-96° 53' 27"	16° 22' 00"
6	20040	Yutama	Río Yutama	Río Yolotepec	CFE	-97° 38' 00"	16° 53' 30"
7	20034	Nduave	Río la esmera	Río Yolotepec	CFE	-97° 36' 00"	16° 02' 55"
8	20042	Yutacua	Río verde	Río Verde	CFE	-97° 37' 30"	16° 36' 21"
9	20041	Nusutia	Río Putla	Río Yolotepec	CFE	-97° 40' 05"	16° 36' 03"
10	20021	Ixtayutla	Río Yolotepec	Río Verde	CONAGUA	-97° 34' 00"	16° 33' 30"
11	20043	El Carrizo	Río verde	Río verde	CFE	-97° 36' 55"	16° 25' 28"
12	20017	Paso de la reina	Río Atoyac	Río Verde	CONAGUA	-97°36' 30"	16°.27'50"
13	20053	Juquilla	Río Juquilla	Río Atoyac	CFE	-97° 18' 30"	16° 13' 30"

*Los dos primeros números corresponden a la región hidrológica

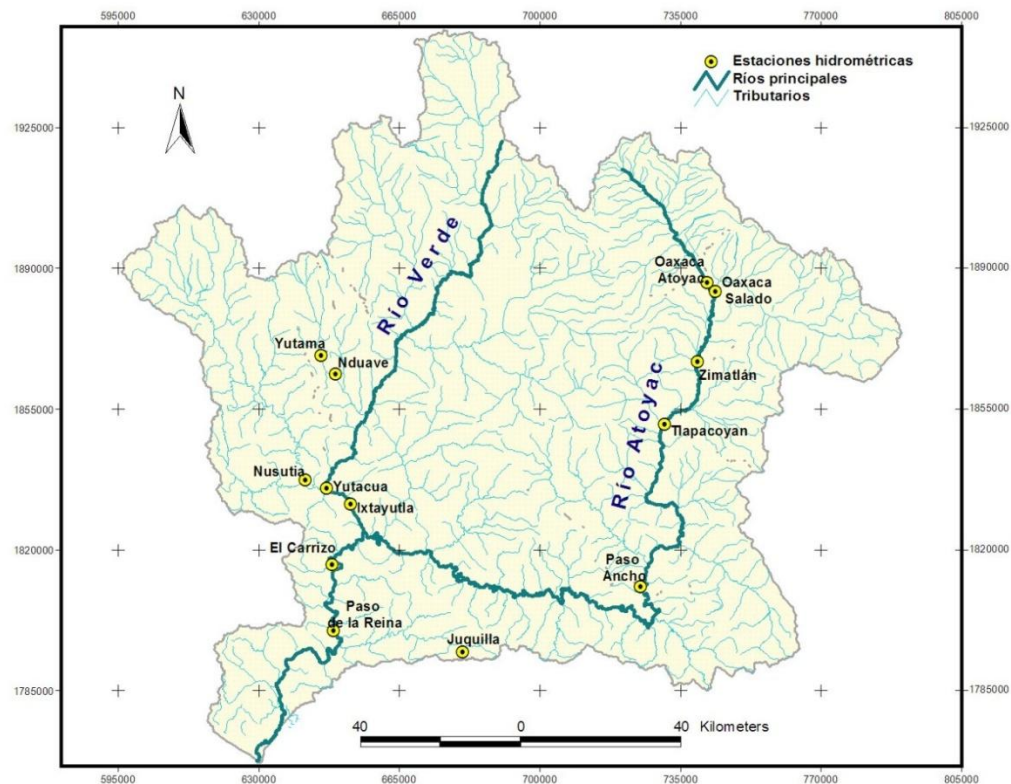


Figura 7. Ubicación de las estaciones hidrométricas operadas por la CONAGUA y la CFE.

El período de información disponible en cada una de las estaciones se señala en la tabla 2.

Tabla 2. Estaciones hidrométricas y sus periodos de información recopilada.

No	CLAVE	ESTACION	Periodo de información recopilado
1	20005	Oaxaca Atoyac	Oct 1972-Ago 1991
2	20017	Paso de la Reina	Ago 1960-Dic 2005
3	20021	Ixtayutla	Feb 1961-Dic 1991
4	20023	Zimatlán	Oct 1972- Sep 2001
5	20026	Tlapacoyan	Oct 1972- Sep 2002
6	20027	Oaxaca Salado	Oct 1972-Ago 1991
7	20034	Nduave	Ene 1954-Mar 1969
8	20036	Paso ancho	Ene 1957-Dic 2006
9	20040	Yutama	Abr 1960-Mar 1969
10	20041	Nusutia	Jun 1969-Dic2005
11	20042	Yutacua	May 1969-Dic 2005
12	20043	El Carrizo	Ago 1969-Dic 2006
13	20053	Juquilla	Ago 1961-Abr 1962

5.4 Subcuencas y disponibilidad de agua del área de estudio

La región hidrológica número 20 Costa Chica de Guerrero, es una de las zonas más activas para la dinámica socioeconómica de la costa de Guerrero, así como de los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, lo que motiva que su crecimiento socioeconómico exija mayor demanda del recurso agua, así como la contaminación del mismo, lo cual agrava los problemas sobre el uso y la disponibilidad del vital líquido en la región, lo que hace necesario propiciar su aprovechamiento integral, uso eficiente, manejo adecuado, distribución equitativa y coadyuvar a alcanzar un desarrollo sustentable, por lo que en cumplimiento a la obligación citada y para el logro de los objetivos mencionados, se ha determinado con base en la “Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso Agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual

de las aguas nacionales”, la disponibilidad de las cuencas hidrológicas que la integran.

A continuación en la tabla 3, se muestra el volumen de disponibilidad de cada una de las subcuencas que conforman la cuenca del Río Verde, según el Acuerdo de disponibilidades de las aguas superficiales de la RH 20, del Diario Oficial de la Federación. (DOF-19/06/2007)

Tabla 3. Disponibilidad de las cuencas que conforman la cuenca del Río Verde
*Clasificación según Acuerdo de disponibilidad del DOF 19/06/07.

Subcuenca	Disponibilidad (Mm ³ /año)	Descripción:
Río Atoyac-Salado.	57.55	El volumen disponible comprende desde el nacimiento del Río Salado hasta el sitio donde se ubica la estación hidrométrica Oaxaca.
Río Atoyac-Tlapacoyan	186.09	El volumen disponible comprende desde el nacimiento del Río Atoyac y donde se ubica la estación hidrométrica Oaxaca, hasta el sitio donde se localiza la estación hidrométrica Tlapacoyan.
Río Sordo-Yolotepec.	3,256.44	El volumen disponible comprende desde el nacimiento de los Ríos Sordo en la zona de la mixteca oaxaqueña y Yolotepec, hasta el sitio donde se localiza la estación hidrométrica Ixtayutla.
Río Atoyac-Paso de la Reina	5,237.54	El volumen disponible comprende desde las estaciones hidrométricas Tlapacoyan e Ixtayutla hasta la estación hidrométrica Paso de la Reina.
Río Verde	5,784.41	El volumen disponible comprende desde la estación hidrométrica Paso de la Reina hasta la desembocadura del Río Verde o Atoyac en el Océano Pacífico.

5.5 Orografía y geología

La sierra Madre del Sur da lugar a ríos complejos, las corrientes de esta región desembocan al Océano Pacífico y no existen cuencas cerradas. Hacia

el oriente, una ramificación de la Sierra Mixteca, origina el parteaguas que separa las cuencas de los ríos Atoyac, Verde y Tehuantepec. Otro ramal de esta sierra que se inicia en San Pablo Coatlán, Oax., y viene de Este a Oeste a rematar a la altura de la desembocadura del Río Verde. Al Norte del Río Verde corre, formando su parteaguas, la sierra Madre de Oaxaca que va de Noroeste a Sureste y divide las cuencas de los Ríos Verde y Papaloapan. (Gómez-Martínez, 2009).

Para tener una visualización de lo mencionado anteriormente, en la figura 8 se presenta el modelo digital de elevación (MDE).



Figura 8. Modelo digital de elevación de la cuenca del Río Verde.

6. Metodología.

La metodología para caracterizar la cuenca del Río Verde, es la siguiente:

Se trabajó con tres componentes:

1. Espacial.
2. Hidrológico.
3. Ambiental.

En el componente espacial se lleva a cabo un reconocimiento de las características físicas de la cuenca, como son; extensión, división por subcuencas, ubicación con respecto a la cuenca, altitud, pendiente, longitud de los cauces principales, escurrimientos, uso del suelo y vegetación. Se trabaja con estas variables para así conocer el área de estudio y saber como estas características están relacionadas con el caudal ambiental.

El componente hidrológico se estudia analizando los registros de las estaciones hidrométricas ubicadas a lo largo de la cuenca y por subcuencas. Tales estaciones contienen datos hidrométricos diarios, que después de ordenarlos pueden utilizarse para aplicar el software IHA-RVN y así establecer el régimen de variabilidad natural de las corrientes para proponer una estrategia de caudal ambiental o volumen necesario para la conservación, toda vez que exista una competencia por el uso del agua.

El componente ambiental se integra identificando zonas de importancia ecológica en relación con los datos de usos de suelo y vegetación actuales en la cuenca, sitios prioritarios para la conservación y presencia de comunidades acuáticas parcialmente identificadas en la cuenca, Figura 9.



Figura 9. Diagrama metodológico.

6.1 Componente Espacial: uso del SIG para caracterización regional

Para este trabajo se utilizó el software ArcGIS 9.3 y ArcView 3.2, ambos funcionan con archivos .shp (polígonos, puntos, líneas), obtenidos de INEGI, CFE, el Inventario Nacional Forestal Serie III y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), todos estos en proyección UTM WGS84.

Esta información se trabaja de manera que se obtengan las capas útiles para conocer a detalle las características de cada punto donde se cuente con datos, y sobre esta información, empezar a construir lo que será el SIG específico para la cuenca del Río Verde.

Con esta herramienta se obtienen; la localización de la cuenca, localización de las estaciones hidrométricas, área de las subcuencas, pendientes y

Localización y longitud de las corrientes, uso de suelo y vegetación, modelo digital de elevación y también se localizan los sitios de importancia ambiental.

6.1.1 Análisis de datos geográficos

Con la finalidad de poder realizar una descripción mejor, se dividió toda la cuenca de estudio en 13 subcuencas como lo muestra la figura 10. La división se llevo a cabo identificando la ubicación y el área de influencia de cada una de las estaciones hidrométricas. A cada una de las subcuencas se les asignó un nombre de acuerdo con las estaciones hidrométricas o el río o corriente a la que pertenecen.

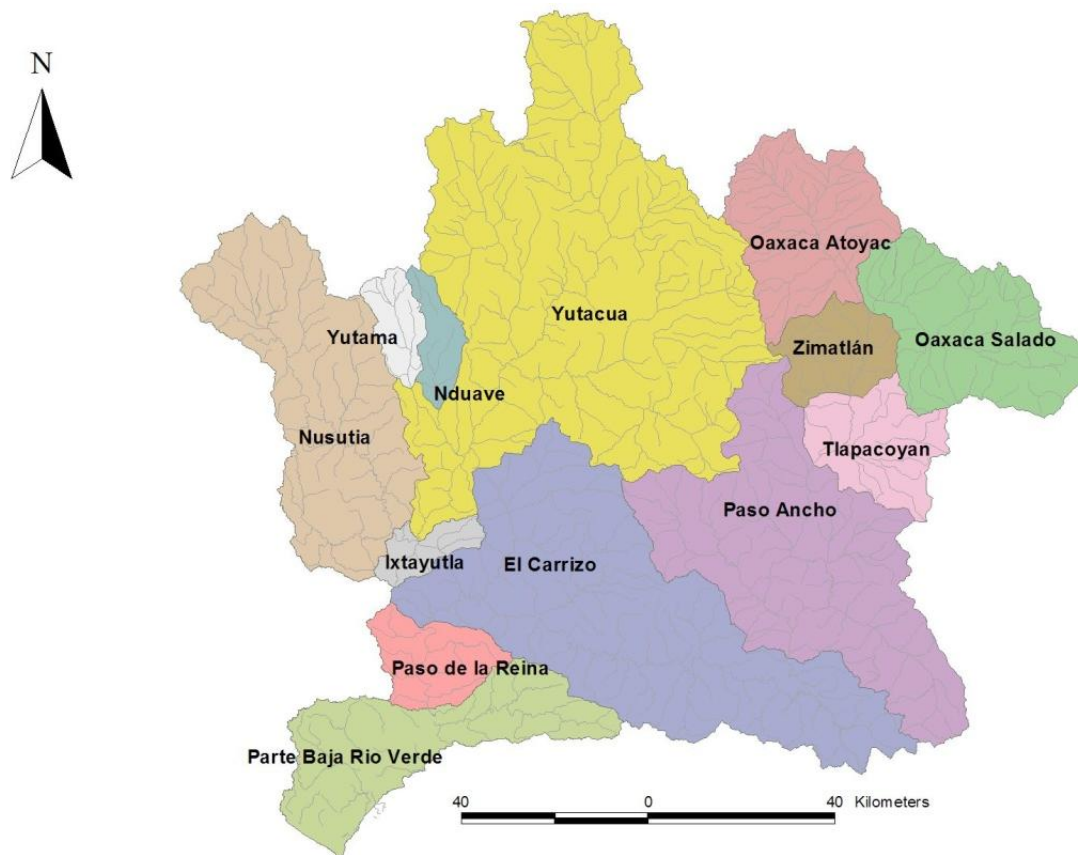


Figura 10. División por subcuencas o áreas de captación.

Localización

Primeramente, para poder ubicar cada uno de los sitios de interés, como son la cuenca del Río Verde y las estaciones hidrométricas, se recopiló la información en escala 1:50 000 y 1:250 000 y en formato vectorizado (georreferenciada) y después, para obtener la localización de estos sitios de interés, se usaron las herramientas de localización y medición del Software Arc View 3.2.

Altitud

Para obtener los valores de altitud, se utilizó el modelo digital de elevación (MDE) obtenido mediante las curvas de nivel cada 20 metros. Se midieron los puntos de interés, que son inicio del tramo y final del tramo, según la clasificación y división de las subcuencas. La fuente de los datos fueron cartas de INEGI, a escala 1:250,000.

Longitud de las corrientes.

Para la medición de los tramos, se utilizó el Software Arc Gis 3.2, usando la capa de hidrología superficial de la cuenca del Río Verde y se determinó la longitud de cada tramo con la herramienta de medición de este software, la capa de hidrología superficial, se encuentra a escala 1:250,000.

6.1.2 Análisis de características físicas

Orden de las corrientes

Es un indicador del grado de bifurcación. Para clasificar las corrientes según su orden, se consideraron los siguientes aspectos:

- El orden de la cuenca está dado por el orden del cauce principal.
- Corrientes de primer orden: pequeños canales que no tienen tributario.
- Corrientes de segundo orden: dos corrientes de primer orden se unen.
- Corrientes de tercer orden: dos corrientes de segundo orden se unen.
- Corrientes de orden $n+1$: dos corrientes de orden n se unen.

Para este estudio se obtuvieron los órdenes de todas las corrientes de la cuenca del Río Verde. En los resultados solo se muestran los órdenes de las corrientes principales, que van desde el orden 2 al 5.

Determinación de las pendientes

Las pendientes de los cauces se determinaron considerando el desnivel entre los extremos del tramo, dividido por la longitud horizontal de dicho tramo, de manera que:

$$S = H/L$$

Siendo:

S pendiente del tramo del cauce

H desnivel entre los extremos del tramo del cauce

L longitud horizontal del tramo del cauce

Dado que la relación entre la distancia recorrida en vertical y la distancia recorrida en horizontal para un mismo segmento de una recta se encuentra en las mismas unidades, la pendiente es una magnitud escalar.

Se puede expresar de forma decimal, la cual es el valor obtenido de la relación del desnivel entre los extremos del tramo del cauce (H), y la longitud horizontal del tramo del cauce (L), como se mencionó anteriormente.

También se puede medir a través del ángulo que forma la recta sobre la horizontal. En ese caso se expresa como:

$$S = \tan^{-1} (H/L)$$

En topografía se suele usar en forma de porcentaje, que se obtiene al multiplicar el valor decimal, por 100, como se expresa a continuación:

$$S(\%) = (H/L) \times 100$$

El porcentaje es una forma como otras de expresar una magnitud adimensional (Gordon et al., 2004).

La información anterior se integrará en un SIG para así tener una herramienta de consulta referente al manejo del agua y estrategias de conservación de la cuenca.

6.2 Componente hidrológico: manejo de información hidrométrica.

Para realizar este trabajo, se partió del arreglo y orden de los datos hidrométricos, disponibles en distintos formatos de presentación. Fue necesario adaptar el formato de estos datos, para cumplir con los requerimientos del software. En seguida se detalla el trabajo realizado sobre los datos hidrométricos mencionados.

6.2.1 Recopilación y análisis de la información hidrométrica

Para llevar a cabo la caracterización, y poder alcanzar los objetivos, se realizó la recopilación de información hidrométrica, de que disponen la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Se usaron series de promedios diarios de datos hidrométricos, contenidos en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) e Hidrométricos de la Comisión Federal de Electricidad, de todas las estaciones ubicadas en diferentes puntos de la cuenca, estas estaciones representan el comportamiento histórico del régimen de caudal del río.

Se integró tanto la disponibilidad de la cuenca, así como las demandas actuales y potenciales para grandes proyectos de desarrollo.

6.2.2 Manejo y transformación de datos hidrométricos

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tienen formatos distintos para trabajar con la información, por lo tanto, fue necesario adaptar esos datos a un formato que requiere el software.

Para calcular el caudal ambiental y volúmenes necesarios para conservación, se seleccionó el software IHA Versión 7.1, el cual requiere que la información hidrométrica tenga un formato genérico de dos columnas, una de ellas con el

valor promedio diario del caudal y otra con la fecha en la que se midió dicho caudal.

Este archivo con formato genérico se crea utilizando una macro programada en lenguaje Visual Basic utilizando la hoja de cálculo de Excel, desarrollada específicamente para este estudio y estudios o trabajos posteriores con información de este tipo. El proceso que se lleva a cabo con la información hidrométrica se muestra en la Figura 11.

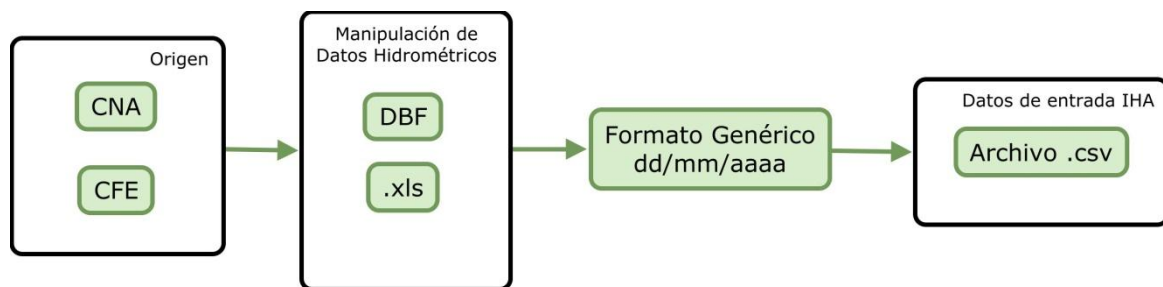


Figura 11. Diagrama de flujo que muestra el trabajo que se hace para adaptar los datos al software IHA Versión 7.1.

6.2.3 Determinación del régimen de variación natural o de caudal ambiental

Se aplicó la metodología IHA-RVN-7.1 (TNC -The nature Conservancy-, 2009) para determinar el régimen de variación natural desarrollada por The Nature Conservancy, basada en el análisis de las series diarias de caudales para determinar la variabilidad intra e inter anual, mensual y diaria.

El software IHA versión 7.1, proporciona resultados de 33 parámetros hidrológicos (TNC -The nature Conservancy-, 2009), categorizados en cinco grupos cuya influencia en el ecosistema se describe a continuación:

Parámetros IHA

Para el régimen de variabilidad natural y la estrategia de caudal, objeto de este trabajo, se utilizaron los parámetros del grupo 1 y 2, porque son los que definen los umbrales de variabilidad que se presentan en el río para diferentes periodos y que pueden interpretarse para la asignación de caudales ecológicos bajo esquemas de uso o presión por el agua.

Los parámetros de los grupos 3, 4 y 5, resultan útiles una vez que se conocen las posibles alteraciones hidrológicas a provocarse en el régimen de variabilidad natural de la cuenca y que por lo tanto deben considerar el momento, la frecuencia, duración y tasa de cambio de los caudales.

Tabla 4. Parámetros IHA y su influencia en el ecosistema (TNC, 2009)

Parámetros IHA	Parámetros Hidrológicos	Influencia en el ecosistema
Grupo1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la media o la mediana para cada mes calendario 12 parámetros	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos ▪ Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas ▪ Disponibilidad de agua para los animales terrestres ▪ Influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua

Parámetros IHA	Parámetros Hidrológicos	Influencia en el ecosistema
<p>Grupo 2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimos anuales, media de 1 día • Mínimos anuales, medias de 3 días • Mínimos anuales, medias de 7 días • Mínimos anuales, medias de 30 días • Mínimos anuales, medias de 90 días • Máximos anuales, media de 1 día • Máximos anuales, medias de 3 días • Máximos anuales, medias de 7 días • Máximos anuales, medias de 30 días • Máximos anuales, medias de 90 días • Cantidad de días con caudal cero • Índice de flujo de base: caudal • Mínimo de 7 días/caudal medio anual <p>12 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equilibrio de organismos sensibles y tolerantes a las presiones ▪ Creación de sitios para la colonización de plantas ▪ Estructuración de los ecosistemas acuáticos por factores abióticos vs. bióticos ▪ Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat ▪ Estrés de la humedad del suelo en las plantas ▪ Deshidratación en los animales ▪ Estrés anaeróbico en las plantas ▪ Volumen del intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación ▪ Duración de las condiciones de presión tales como bajo nivel de oxígeno y concentración de sustancias químicas en los ambientes acuáticos ▪ Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación ▪ Duración de los caudales altos para la eliminación de residuos, aeración de los lechos de desove en los sedimentos del canal.
<p>Grupo 3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día • Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día <p>2 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos ▪ Predictibilidad / reducción del estrés en los organismos ▪ Acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación ▪ Indicios para el desove de los peces migratorios ▪ Evolución de las estrategias de los ciclos biológicos, mecanismos de comportamiento

Parámetros IHA	Parámetros Hidrológicos	Influencia en el ecosistema
<p>Grupo 4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico • Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días) • Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico • Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días) <p>4 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas ▪ Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas ▪ Disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos ▪ Intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación ▪ Disponibilidad de minerales del suelo ▪ Acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas ▪ Influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos)
<p>Grupo 5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas</p>	<p>Tasas de ascenso: media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos</p> <p>Tasas de descenso: media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos</p> <p>Cantidad de inversiones hidrológicas</p> <p>3 parámetros</p> <hr/> <p>Total 33 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes) ▪ Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes) ▪ Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente (varial zone)

Recomendaciones y generalidades del software IHA Versión 7.1

El software IHA V. 7.1 recomienda un análisis no-paramétrico ya que este tipo de estadísticas son útiles por la naturaleza sesgada (no normal) de muchos conjuntos de datos hidrológicos y muestra los resultados del análisis en percentiles y medianas mensuales (TNC, 2009).

La sección de resultados del Software IHA se despliega de manera tabulada como pestañas, que de izquierda a derecha, se pueden consultar en la siguiente forma, Figura 12:

- ✓ Estadísticas anuales, mensuales, y por distintos periodos (pestaña ann)
- ✓ Estadísticas del periodo de análisis (20 años) de los parámetros del Grupo 1 y 2 (medianas y coeficientes de dispersión para períodos mensuales [1] y Máx y Mín de 1, 3, 7, 30 y 90 días [2])
- ✓ Regresiones lineales de los datos
- ✓ Tablas de percentiles
- ✓ Clasificación de caudales diarios
- ✓ Curvas de duración o probabilidad de excedencia y por último
- ✓ Mensajes.

Year	June	July	August
1970	108.5	200	44
1971	135	151	26
1972	303.5	172	15
1973	121	157	41
1974	285.5	441	30
1975	205	306	30
1976	74.8	206	14
1977	235	131	19
1978	179.5	175	19

Figura 12. Sección de resultados para análisis No-Paramétrico IHA.

En esta hoja de resultados; los resultados anuales (ann), las medianas y percentiles correspondientes a la pestaña de percentiles (pct) y los parámetros del grupo 1 y 2 de la pestaña (sco), se calculan aplicando el “método circular” (mencionado en capítulo 6.3.4).

Los coeficientes de dispersión y $(75-25)/50$ en la tabla de percentiles (pct) se calculan tomando el valor absoluto de la distancia más corta entre las fechas de los percentiles 75 y 25, incluso si esta distancia cruza el límite del año juliano, y normaliza este valor por 366. (TNC, 2009)

Para el conjunto de datos con los que se cuenta (datos hidrométricos), este tipo de análisis es el más adecuado, dada su distribución y la naturaleza de los datos. Los archivos de datos de las estaciones hidrométricas analizadas contienen registros de promedios diarios de caudal en metros cúbicos por segundo y la mayoría de ellos con periodos mayores a 20 años de registro (Richter, 1997).

6.3 Componente ambiental: análisis de condiciones ambientales y recursos por proteger

6.3.1 Importancia ecológica

La importancia ecológica de las subcuencas se determinó en función de la presencia de regiones y sitios prioritarios para la conservación (Arriaga *et al.*, 2009) (Patricia Koleff *et al.*, 2009). Para identificar los sitios prioritarios la Conabio dividió la superficie terrestre del país en 8,045 hexágonos de 256

km² cada uno. Se usó el programa Marxan que aplica un algoritmo de optimización, para evaluar 1,450 elementos de la biodiversidad de interés para la conservación, así como 19 capas de diversos factores de amenaza. De esta forma se seleccionaron aquellos hexágonos que se definieron como prioritarios porque permiten cumplir con las metas de conservación establecidas para los distintos elementos de la biodiversidad. Al mismo tiempo se señalan los sitios que se encuentran bajo la protección de alguna ANP federal, estatal o municipal en la cuenca del Río Verde.

6.3.2 Recursos por proteger

Existen escasos registros de colectas en la cuenca, tanto de peces como de langostinos, por lo que es difícil establecer de forma específica las especies por proteger en la cuenca de ambas comunidades. Sin embargo, durante los estudios llevados a cabo para la CFE entre 2008 y 2009 (inéditos), se colectaron y registraron por personal de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (ENCB) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), principalmente en los últimos 60 km antes de la desembocadura.

6.3.3 Alteración Eco-hidrológica

El grado de alteración eco-hidrológica de la cuenca del Río Verde, se obtuvo del modelo de análisis geográfico multi-criterio que pondera 75 criterios y los organiza jerárquicamente para obtener valores entre 0 y 1 como alteración inexistente o máxima aplicado por el INE (Garrido et al., 2010). Entre estos criterios los de mayor peso corresponden a la densidad de infraestructura hidráulica y su frecuencia como indicador de fragmentación;

longitud de canales vs longitud de red fluvial y su intersección con vías de comunicación. Asimismo, los autores consideraron criterios de calidad del agua como la demanda bioquímica de oxígeno DBO, y la concentración de sólidos suspendidos totales SST, además de la presencia de especies invasoras y el cambio en el uso del suelo y vegetación a escalas 1:250 000 y un resultante índice de urbanización.

6.3.4 Presión de uso

Para clasificar las cuencas, se ha utilizado fundamentalmente la disponibilidad media anual de las aguas nacionales determinada por medio de la NOM-011-CNA-2000 como la disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica es el valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo. Esta variable indica la cantidad de recurso hídrico disponible al final de una unidad de gestión o cuenca.

La presión de uso se determinó como la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca, conforme a la información publicada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011b). El nivel de la presión de uso se estableció de acuerdo a los valores:

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

Al combinar esta información con la importancia ecológica (sitios prioritarios – alteraciones eco-hidrológicas) se establece el objetivo ambiental de cada subcuenca el cual puede ser alto (A), medio (B) y bajo (C), y es considerado para la asignación de porcentajes de caudal ecológico en el proyecto de norma (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011). Los requerimientos de caudal son proporcionales al objetivo ambiental de conservación que le corresponde a cada cuenca.

6.4 Recomendaciones para establecer una estrategia de caudales ecológicos

Con el análisis no paramétrico se reconoció el régimen natural de variabilidad mensual en el río y los límites que señalan años promedio, secos y lluviosos. Otros indicadores de esta variabilidad que también ayudan a entender el comportamiento del río y a considerar los límites o umbrales que se deben considerar para asignar o descargar de forma distinta a la natural fueron los caudales de períodos extremos ya sea de 1, 3, 7, 30 y 90 días, tanto máximos como mínimos.

Con base en la clasificación de los tramos del Río Verde, se establecieron los caudales ecológicos a considerar, bajo esquemas de distribución del agua. Por otro lado, de la distribución de percentiles se establecieron los umbrales para cuando se requiera extraer agua en el río.

Por otra parte, se señaló el umbral superior para cambios en las descargas diarias o mensuales que se incrementen como puede ser por la generación

de energía eléctrica, considerando hasta los percentiles relacionados con años lluviosos.

6.5 Sistema de Información Geográfica (SIG)

El Sistema de Información Geográfica o SIG, es una herramienta de consulta de información, que integra los elementos informáticos, como lo son: Tablas, mapas, gráficos y características físicas que se obtuvieron de este trabajo.

Los sistemas utilizados fueron los programas de: ArcView 3.2 y ArcGIS 9, los cuales sirvieron para generara las diferentes capas, y que además, junto con la información obtenida, se programó en ArcGIS 9, la interfaz de usuario que proveerá un fácil manejo y presentación de la información.

7. Resultados

7.1 Características físicas y espaciales de la cuenca

La división por subcuencas o área de influencia de las estaciones hidrométricas, dio como resultado 13 zonas en las cuales se trabajó para medir áreas, longitudes y pendientes, al mismo para cada río se calcularon los órdenes de las corrientes. A cada una de las subcuencas o áreas de captación obtenidas, se le asignó un nombre de acuerdo con las estaciones hidrométricas o el río o corriente a la que pertenecen Figura 13.

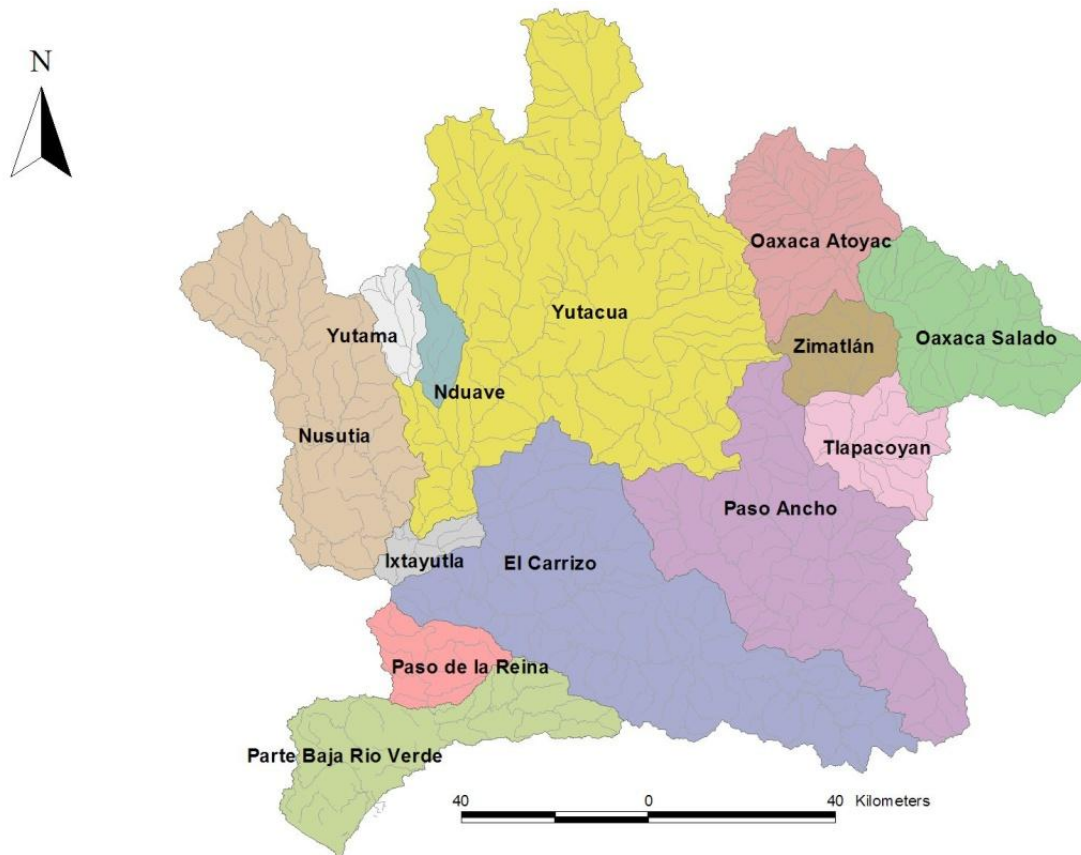


Figura 13. Áreas de influencia o subcuencas.

En la tabla 5 se muestran las áreas calculadas para cada una de las subcuencas obtenidas:

Tabla 5. Áreas de subcuencas.

Subcuenca	Área (km ²)
Oaxaca Atoyac	1026.54
Oaxaca Salado	1198.68
Zimatlán	433.50
Tlapacoyan	600.79
Paso Ancho	2513.65
Yutama	216.27
Nduave	204.15
Yutacua	5153.96
Nusutia	1982.35
Ixtayutla	182.36
El Carrizo	3246.73
Paso de la Reina	420.78
Bajo Río Verde	1186.36

7.1.1 Longitud y pendiente de los cauces principales

El cauce principal es la corriente de mayor longitud dentro de la cuenca (o subcuenca). Para la cuenca del Verde se consideraron dos corrientes formadoras principales, que tuvieron una longitud desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura con el mar de:

- 1) Atoyac-Verde 327 km
- 2) Verde: 240 km (Figura 14).

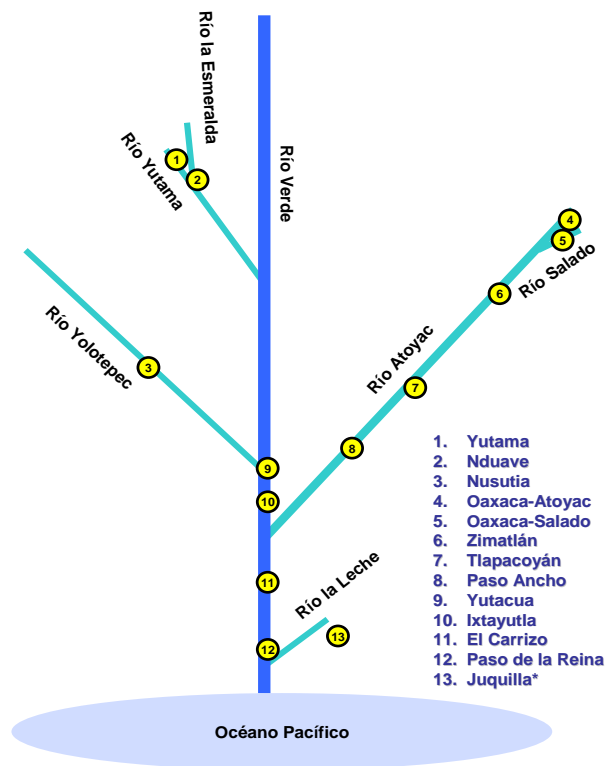


Figura 14. Diagrama unifilar de los ríos principales y estaciones hidrométricas dentro de la cuenca.

Se reconocieron las características geofísicas de la cuenca como la longitud y pendiente de los tributarios y cauce principal. Los primeros, exhibieron una pendiente entre 0.17% y 2.38% y una longitud de entre 28.92 y 181.55 km, siendo este último el río Atoyac. Mientras que en el cauce principal, estos valores fueron entre 0.08% y 2.58% de pendiente y 42.41 y 156.81 km de longitud, en los distintos tramos, haciendo un total de 240 km.

La pendiente del cauce principal es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta, es decir, si se tienen dos cuencas con la misma forma y área, pero con diferente pendiente del cauce principal, se producirá una respuesta más rápida y un caudal mayor en aquella cuenca con mayor pendiente ante una tormenta presentada.

Con la información de los ríos escala 1:250 000 y 1:50 000 y el software Arc-View, se determinó el cauce principal y cada una de las subcuencas, así como su longitud y pendiente media.

La tabla 6, nos muestra la pendiente en los cauces principales de la cuenca; a valores más altos de pendiente, quiere decir que la velocidad de la corriente es mayor.

Tabla 6. Longitudes y pendientes de los cauces principales.

No.	Subcuenca	Longitud del cauce L (km)	Pendiente del cauce (%)
1	Oaxaca Atoyac	48.27	0.500
2	Oaxaca Salado	63.55	0.172
3	Zimatlán	36.72	0.785
4	Tlapacoyan	34.41	0.489
5	Paso Ancho	93.14	0.546
6	Yutama	28.92	2.382
7	Nduave	34.09	1.654
8	Yutacua	156.81	1.076
9	Nusutia	102.48	0.741
10	Ixtayutla	19.96	2.580
11	El Carrizo	181.55	1.33
12	Paso de la Reina	42.41	1.442
13	Bajo Río Verde	69.52	0.086

7.1.2 Orden de las corrientes

Es importante obtener el orden de las corrientes ya que ayuda a conocer la velocidad de drenado de la cuenca o subcuenca, el drenado de una corriente con mayor orden, desalojará rápidamente el agua.

Los resultados obtenidos van desde el primer orden, hasta el orden 5 para el propio Río Verde, que toma esa clasificación desde la parte media-alta de la cuenca, hasta llegar a la desembocadura con el mar, Figura 15.

En la Tabla 7 solo se muestran los órdenes de las corrientes principales que van del orden 2 al orden 5.

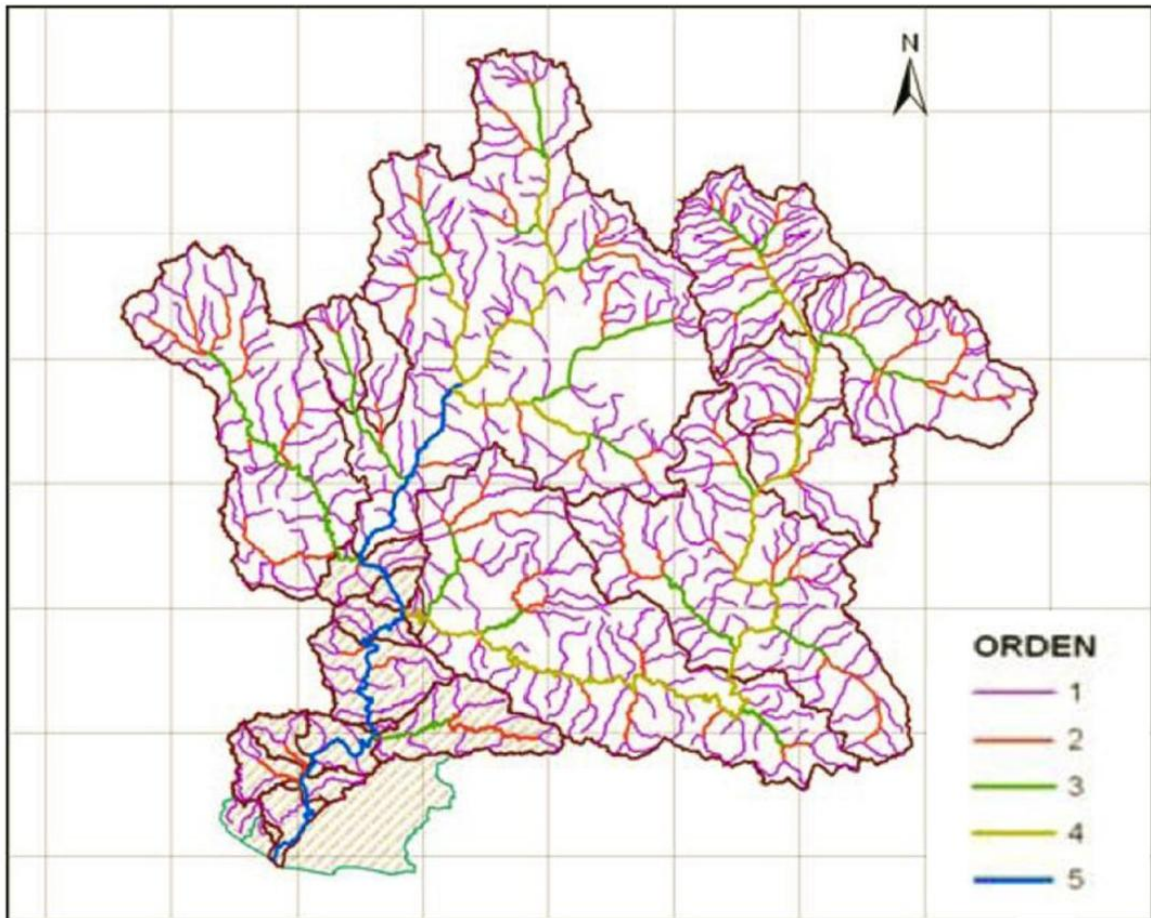


Figura 15. Orden de las corrientes en el área de estudio.

Tabla 7. Orden de las corrientes principales.

No.	Corriente	Orden
1	Oaxaca Atoyac	4
2	Oaxaca Salado	3
3	Zimatlán	4
4	Tlapacoyan	4
5	Paso Ancho	4
6	Yutama	3
7	Nduave	2
8	Yutacua	5
9	Nusutia	3
10	Ixtayutla	5
11	El Carrizo	5
12	Paso de la Reina	5
13	Bajo Río Verde	5

7.1.3 Uso de Suelo y Vegetación actuales.

La figura 16 muestra el uso de suelo y vegetación a lo largo y ancho de la cuenca. Se puede observar en la tabla 8 y figura 17, el porcentaje de cada uno de estos usos y vegetación. La vegetación dominante es el bosque de pino encino con un 22% en la parte media de la cuenca, seguido por agricultura de temporal (20%) y pastizal inducido (14%), lo cual nos permite determinar los principales aprovechamientos de agua en la cuenca, además, cabe señalar que la zona urbana (0.69%) requiere de extracciones de agua para uso y consumo humano. Con esta información se pueden considerar las zonas con mayor arrastre de sedimentos y mayores escurrimientos.

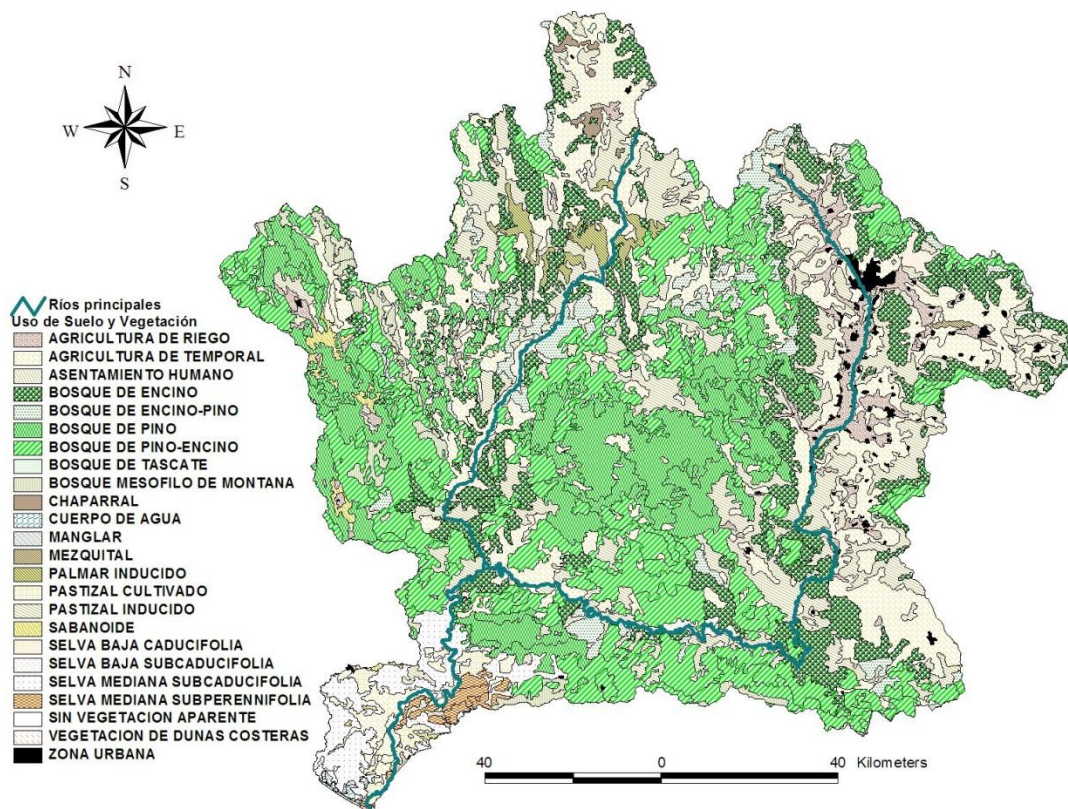


Figura 16. Uso de suelo y vegetación en la cuenca de Río Verde.

Tabla 8. Tipo de vegetación y porcentaje cobertura en toda la cuenca

Tipo De Vegetación	Área km ²	%
Bosque De Pino-Encino	4049.90	22.05
Agricultura De Temporal	3698.90	20.14
Pastizal Inducido	2724.50	14.84
Bosque De Pino	2711.50	14.77
Bosque De Encino	2210.00	12.03
Bosque De Encino-Pino	657.50	3.58
Agricultura De Riego	550.50	3.00
Selva Mediana Subcaducifolia	518.60	2.82
Bosque Mesófilo De Montaña	251.50	1.37
Selva Baja Caducifolia	204.30	1.11
Palmar Inducido	177.50	0.97
Pastizal Cultivado	126.10	0.69
Zona Urbana	125.90	0.69
Selva Mediana Subperennifolia	115.40	0.63
Sabanoide	99.80	0.54
Chaparral	43.70	0.24
Selva Baja Subcaducifolia	28.30	0.15
Cuerpo De Agua	23.40	0.13
Mezquital	11.30	0.06
Asentamiento Humano	8.60	0.05
Manglar	8.30	0.05
Bosque De Táscate	7.30	0.04
Sin Vegetación Aparente	5.70	0.03
Vegetación De Dunas Costeras	5.00	0.03
Área Total	18363.7	100

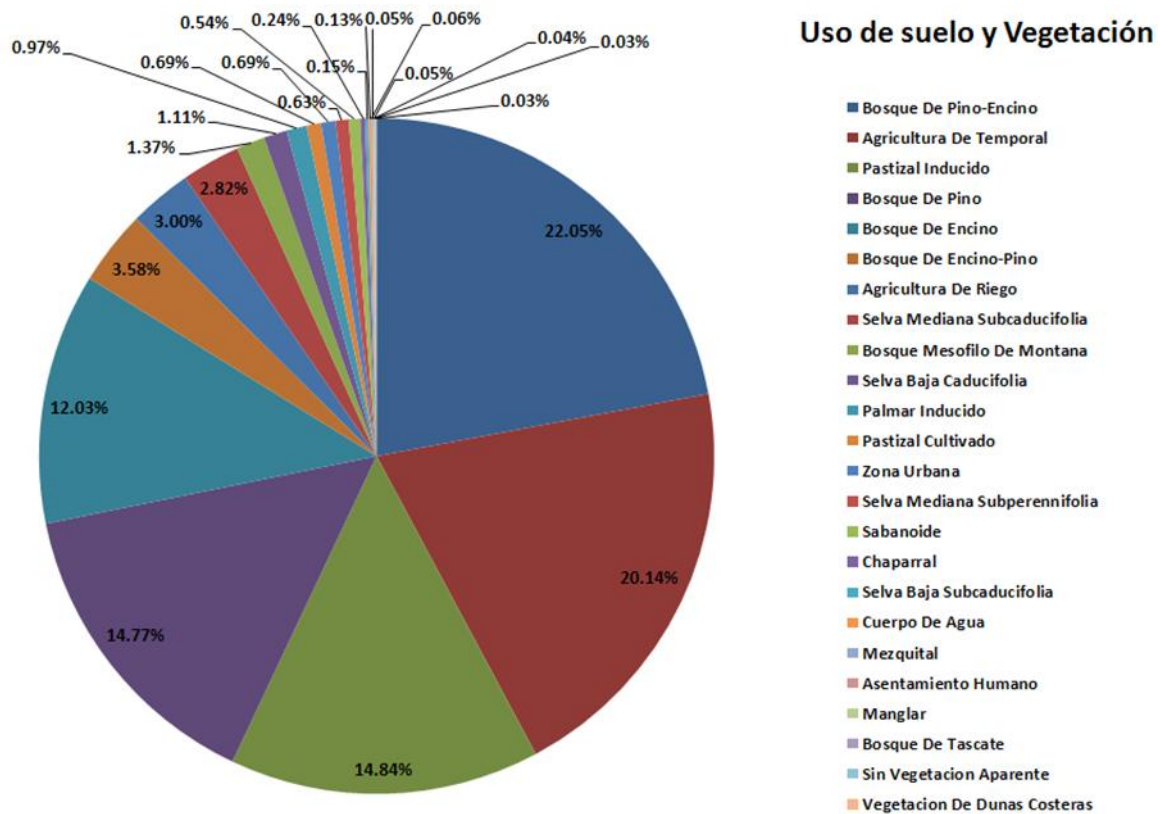


Figura 17. Porcentajes de los diferentes usos de suelo y vegetación en la cuenca.

7.2 Características hidrológicas de la cuenca.

7.2.1 Variación intra-anual.

Se identificaron 13 estaciones hidrométricas, de las cuales se analizaron solo 12, ya que la estación Juquilla solo contaba con un periodo de 9 meses de datos y se omitió. Se ordenaron los datos de 12 estaciones y se calcularon promedios diarios de los años de registro en cada estación, para identificar la variación intra-anual, que nos muestra lo que ocurre en un periodo de un año y la contribución de cada una al caudal de la cuenca, figura 18.

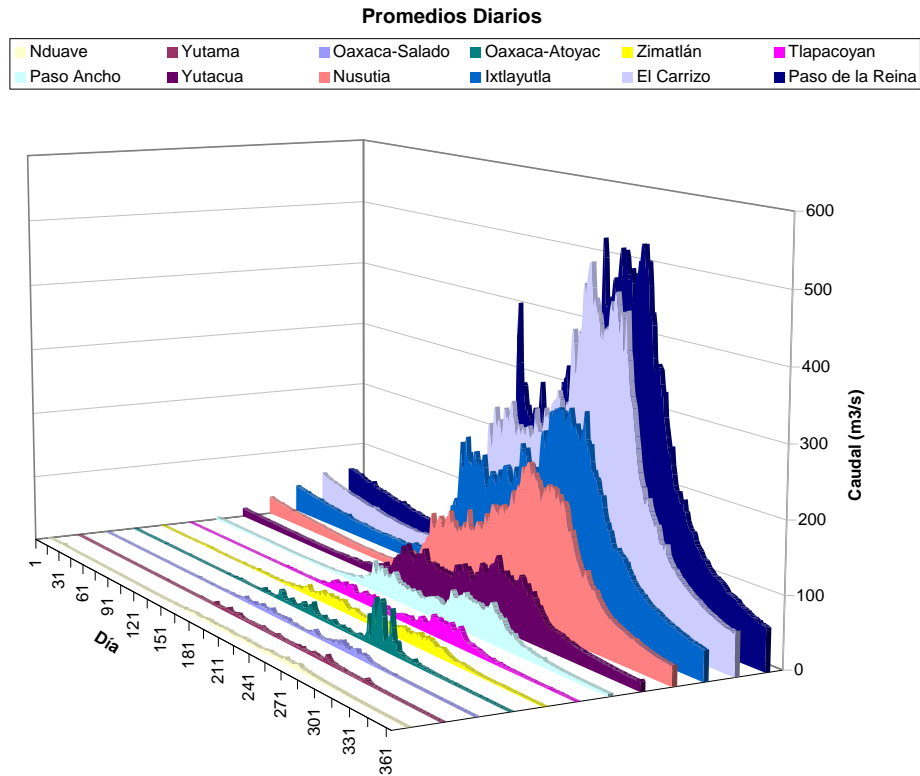


Figura 18. Promedios diarios de estaciones hidrométricas ordenadas en forma ascendente.

En el gráfico anterior, se puede observar la agregación de las corrientes a la corriente principal, siendo las dos últimas estaciones (El Carrizo y Paso de la Reina) las más cercanas a la desembocadura con el mar. También una característica importante que muestra este tipo de gráficos es la estacionalidad en toda la cuenca y la variación natural en cada uno de los sitios.

Para conocer los eventos extremos ocurridos históricamente, se obtuvieron los valores mínimos y máximos y se calculó también el caudal medio anual para cada estación hidrométrica, tabla 9.

Tabla 9. Caudal medio anual y valores máximos y mínimos.

CLAVE	ESTACION	Mínimo (m3/s)	Máximo (m3/s)	Caudal Medio Anual (M3/s)
20005	Oaxaca Atoyac	0	265.30	1.30
20027	Oaxaca Salado	0	196.55	0.89
20040	Yutama	0.15	85.00	1.02
20034	Nduave	0.05	54.70	1.81
20026	Tlapacoyan	0	289.52	5.37
20036	Paso ancho	0.07	829.00	11.88
20023	Zimatlán	0	497.62	4.45
20042	Yutacua	1.90	527.00	25.95
20041	Nusutia	4.70	1178.00	62.69
20021	Ixtayutla	1.49	1362.93	92.39
20043	El Carrizo	10.60	3429.00	132.74
20017	Paso de la Reina	7.60	4891.69	161.50
20053	Juquilla*	0.25	2.38	ND

*La estación Juquilla se omitió porque solo cuenta con 9 meses de datos. ND = No determinado

Variación intra-anual diaria.

Del análisis de datos hidrológicos diarios se calculó la media de los valores diarios de caudal y se generaron los siguientes hidrogramas que muestran el comportamiento natural, en los cuales se puede observar el día en el que inicia la temporada de estiaje/lluvias, así como el comportamiento promedio diario histórico, para cada una de las estaciones hidrométricas, Figuras 19-30.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Paso de la Reina

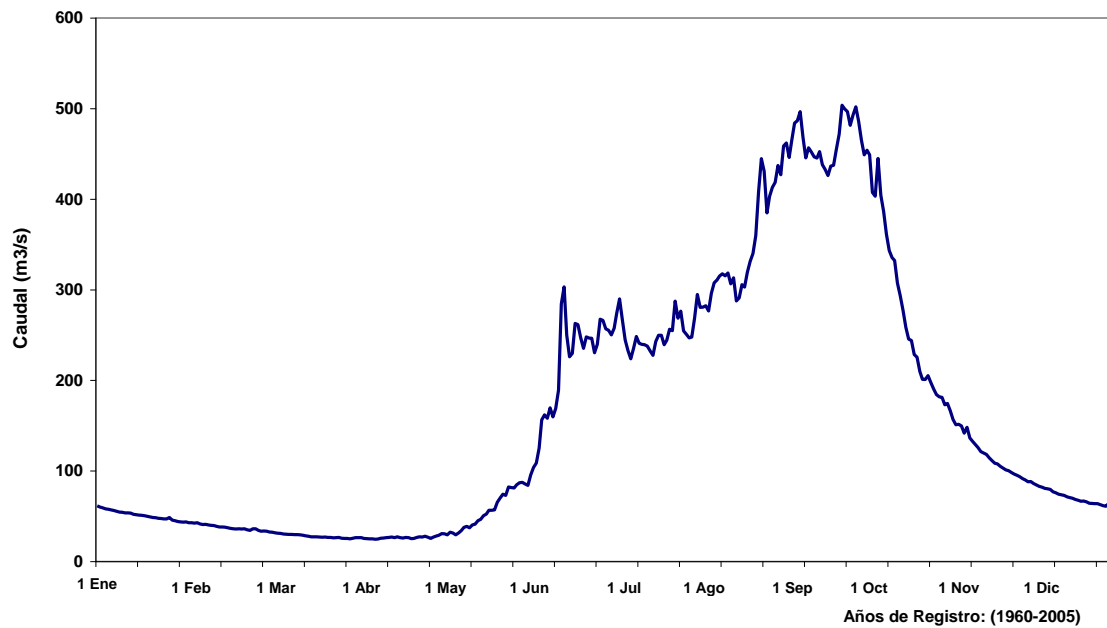


Figura 19. Variación inter-anual para la estación Paso de la Reina.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
El Carrizo

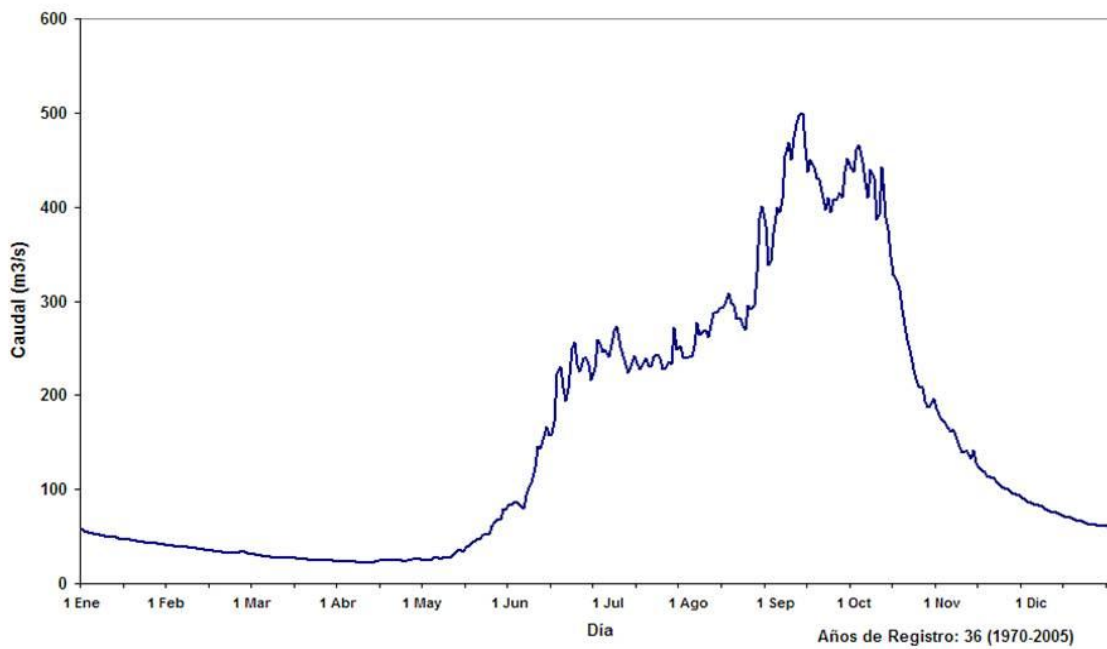


Figura 20. Variación inter-anual para la estación El Carrizo.

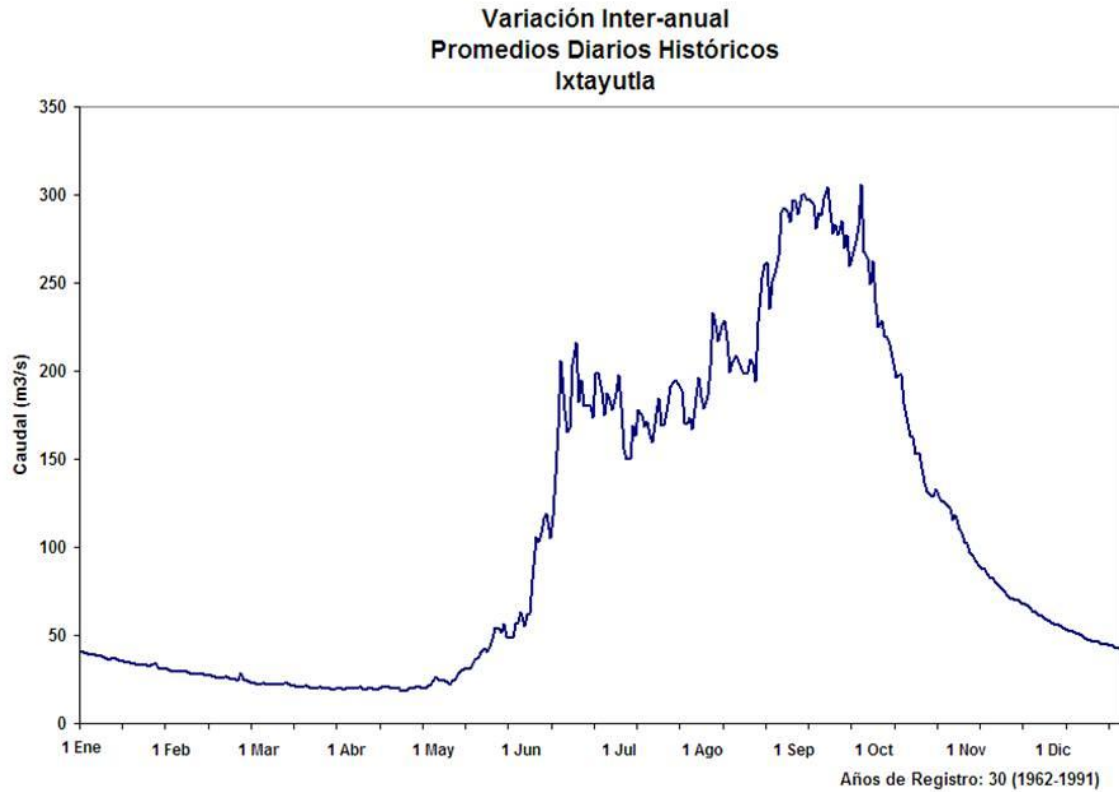


Figura 21. Variación inter-anual para la estación Ixtayutla.

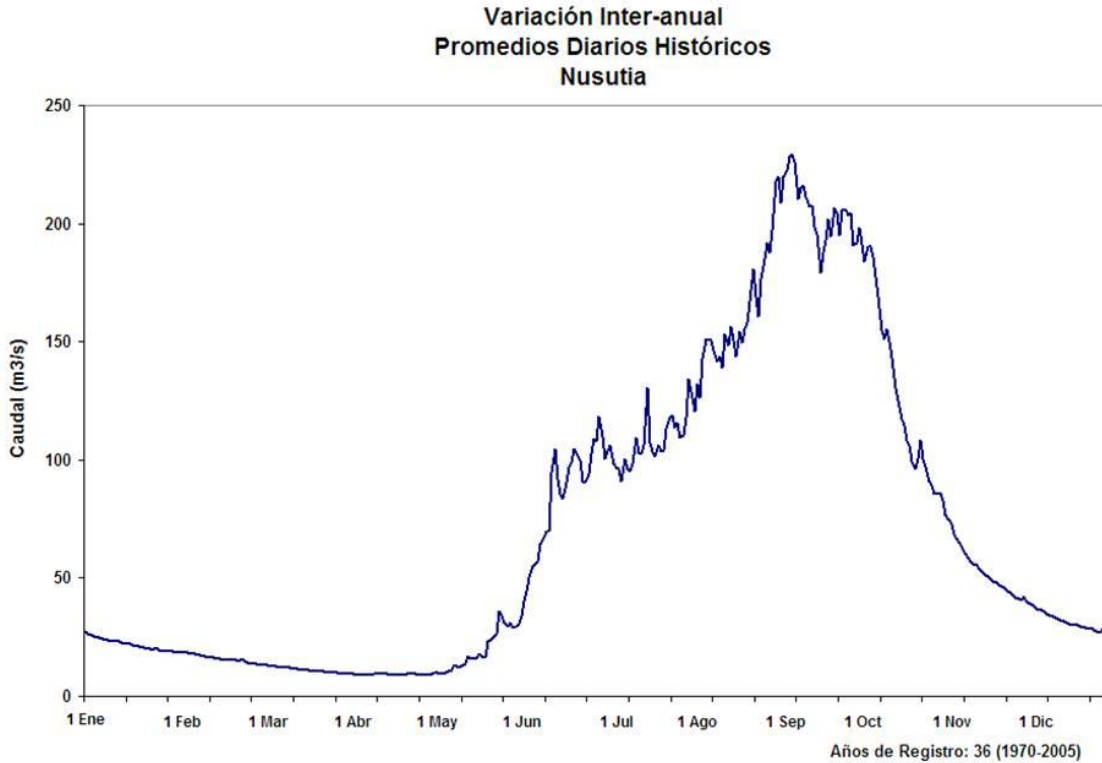


Figura 22. Variación inter-anual para la estación Nusutia.

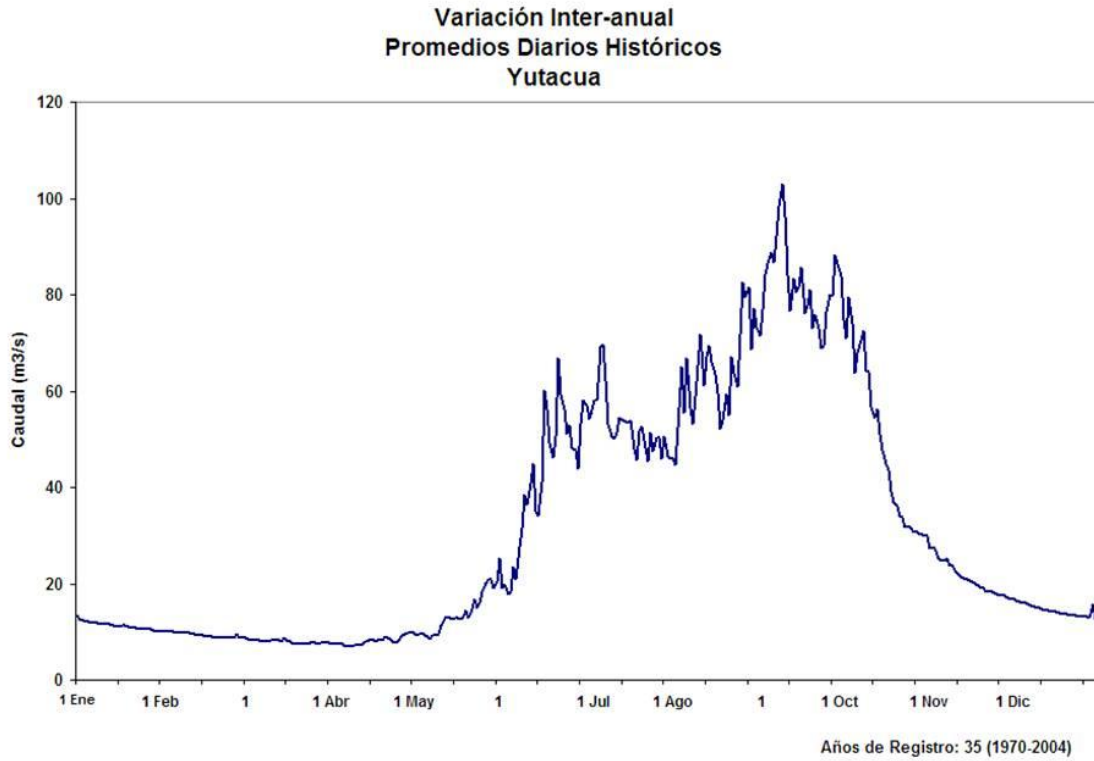


Figura 23. Variación inter-anual para la estación Yutacua.

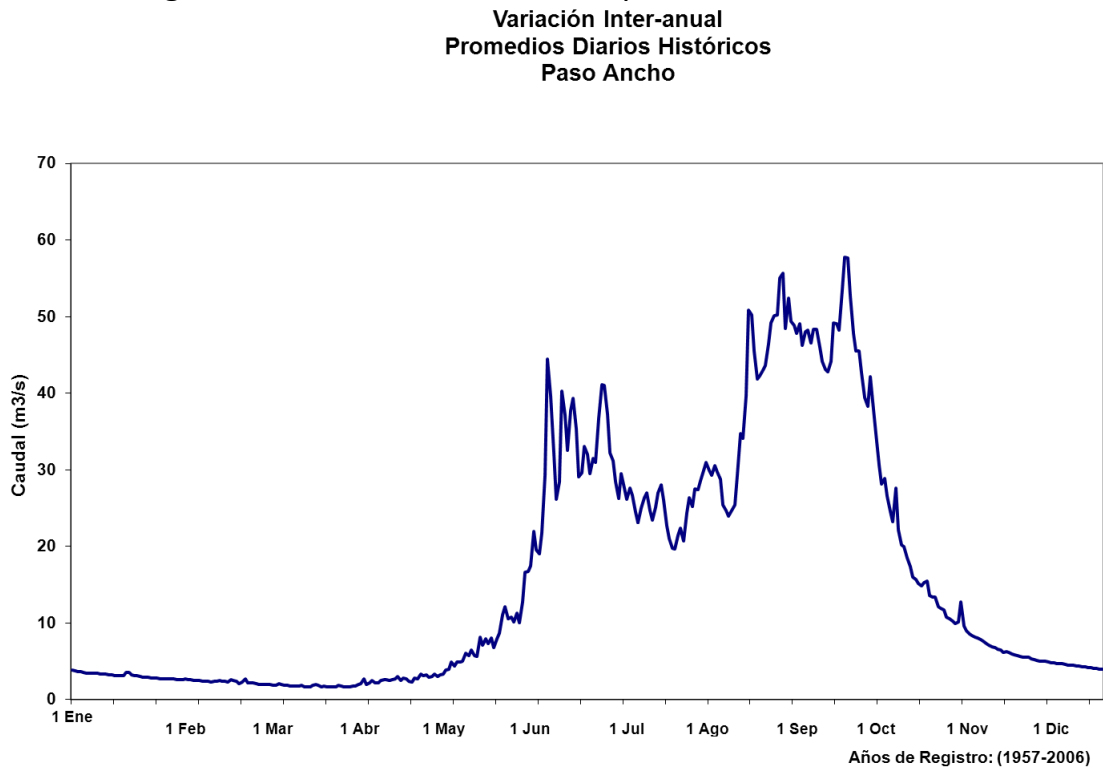


Figura 24. Variación inter-anual para la estación Paso Ancho.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Tlapacoyan

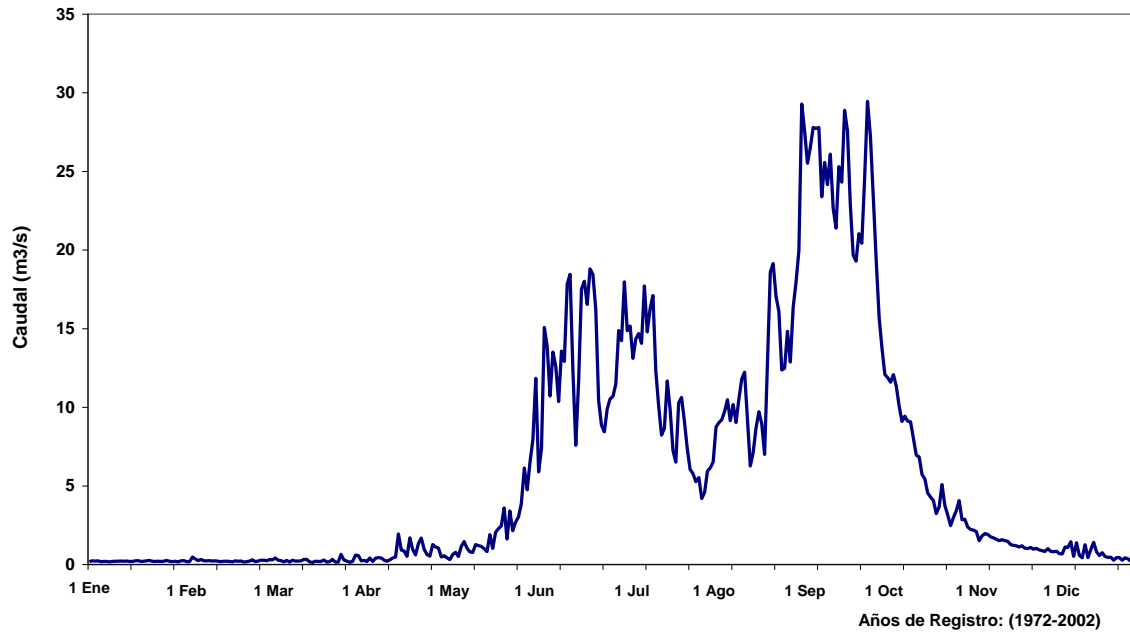


Figura 25. Variación inter-anual para la estación Tlapacoyán.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Zimatlán

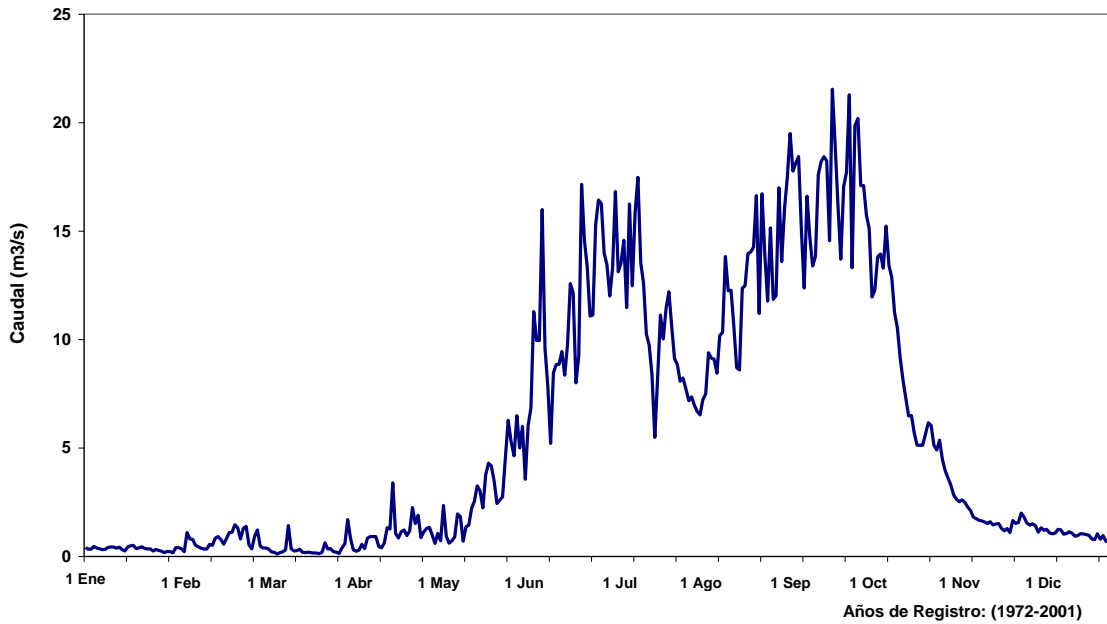


Figura 26. Variación inter-anual para la estación Zimatlán.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Oaxaca Atoyac

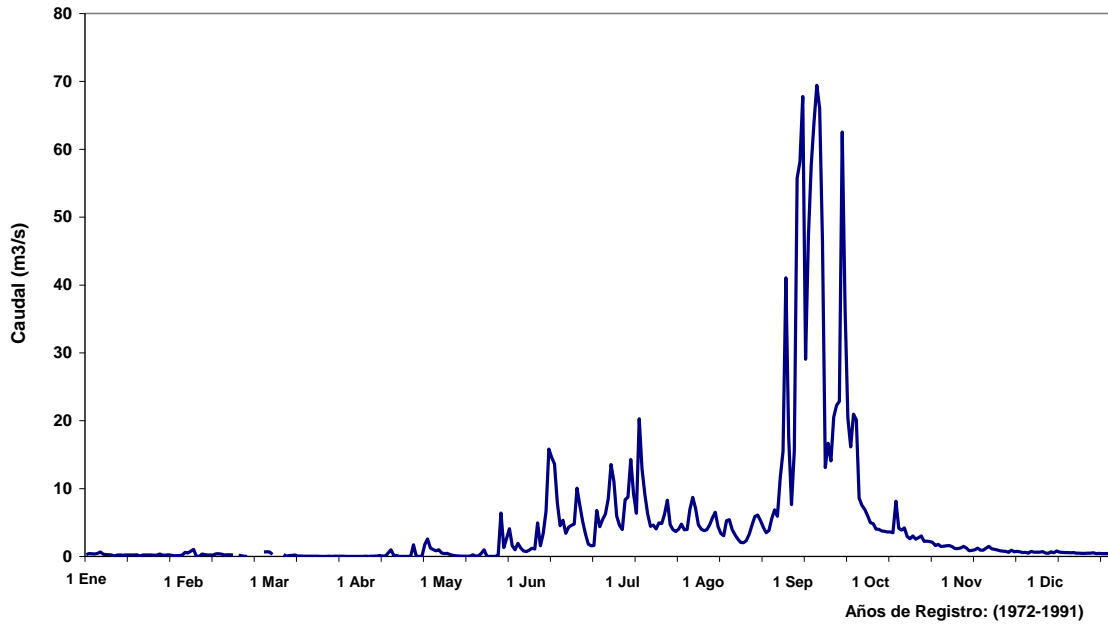


Figura 27. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Atoyac.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Oaxaca Salado

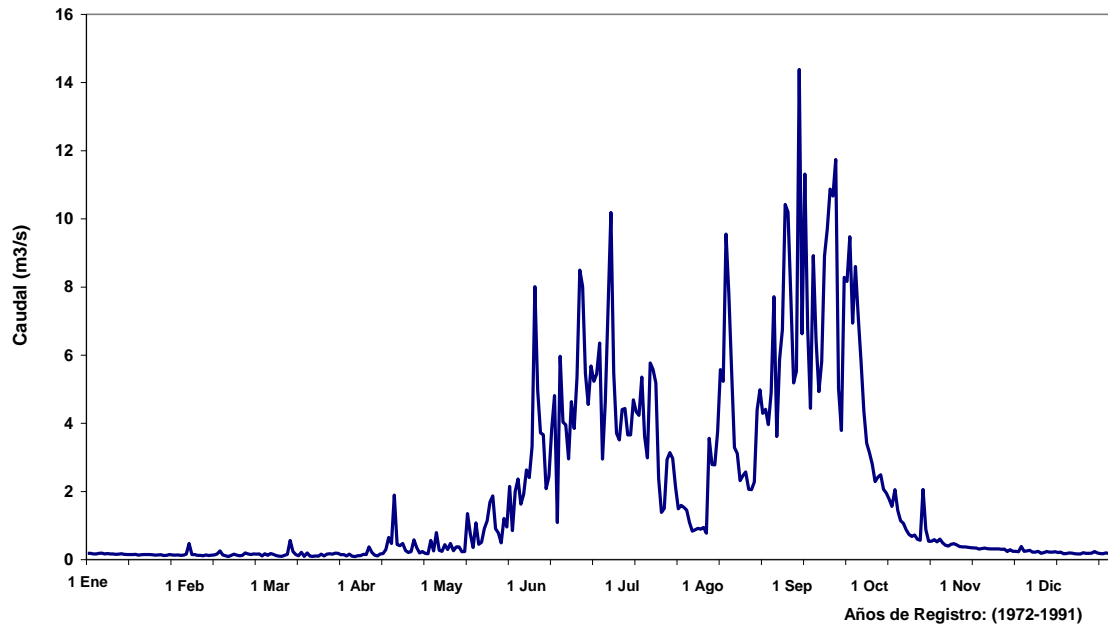


Figura 28. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Salado.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Yutama

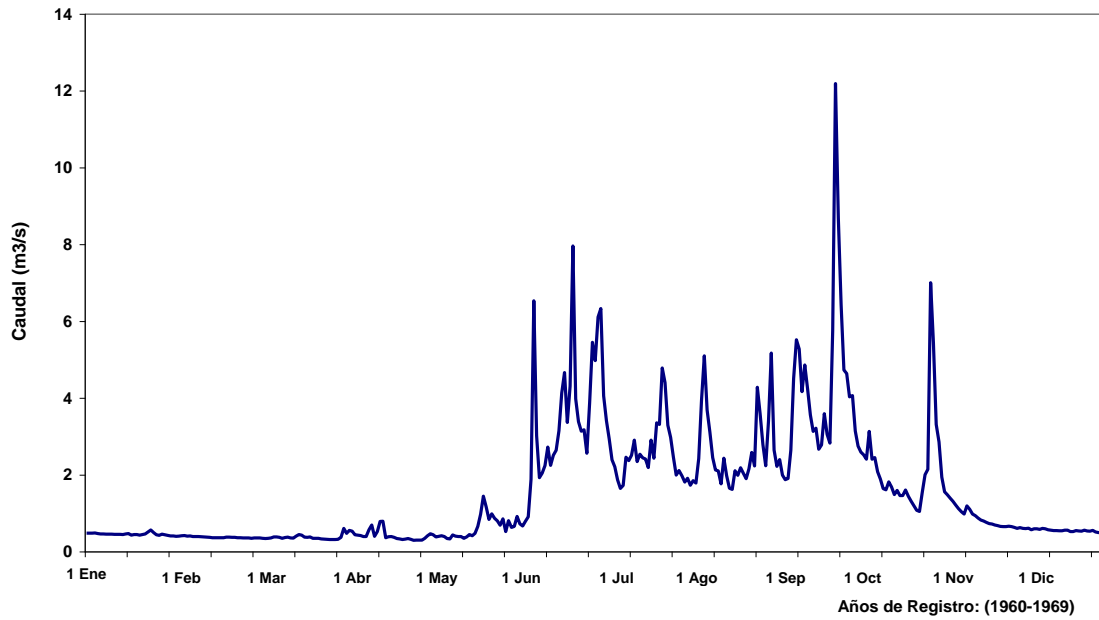


Figura 29. Variación inter-anual para la estación Yutama.

Variación Inter-anual
Promedios Diarios Históricos
Nduave

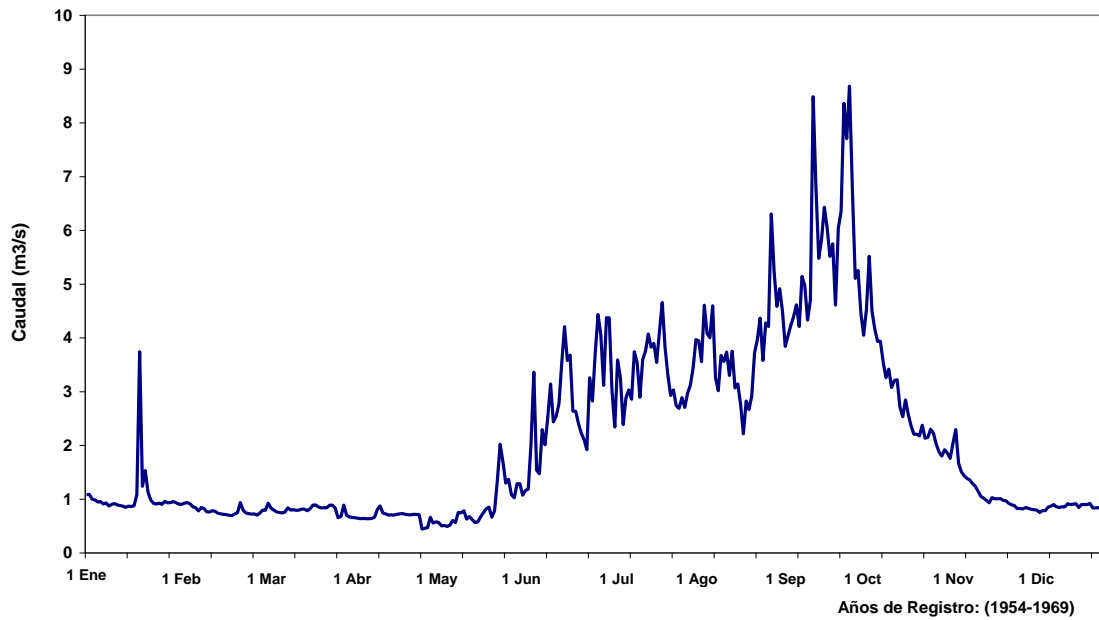


Figura 30. Variación inter-anual para la estación Nduave.

Variación intra-anual mensual

Del análisis de datos hidrológicos diarios, se calcularon medianas mensuales de los valores del caudal y se construyeron los siguientes gráficos que muestran el comportamiento natural que ocurre en un periodo de un año, en los cuales se puede observar la estacionalidad (lluvias/estiaje), para cada una de las estaciones hidrométricas. Se observa que, la mayoría de ellas muestran un comportamiento similar aunque las variaciones en el los valores de los caudales disminuyan o se localicen en diferentes sitios a lo largo y ancho de la cuenca, figuras 31-42.

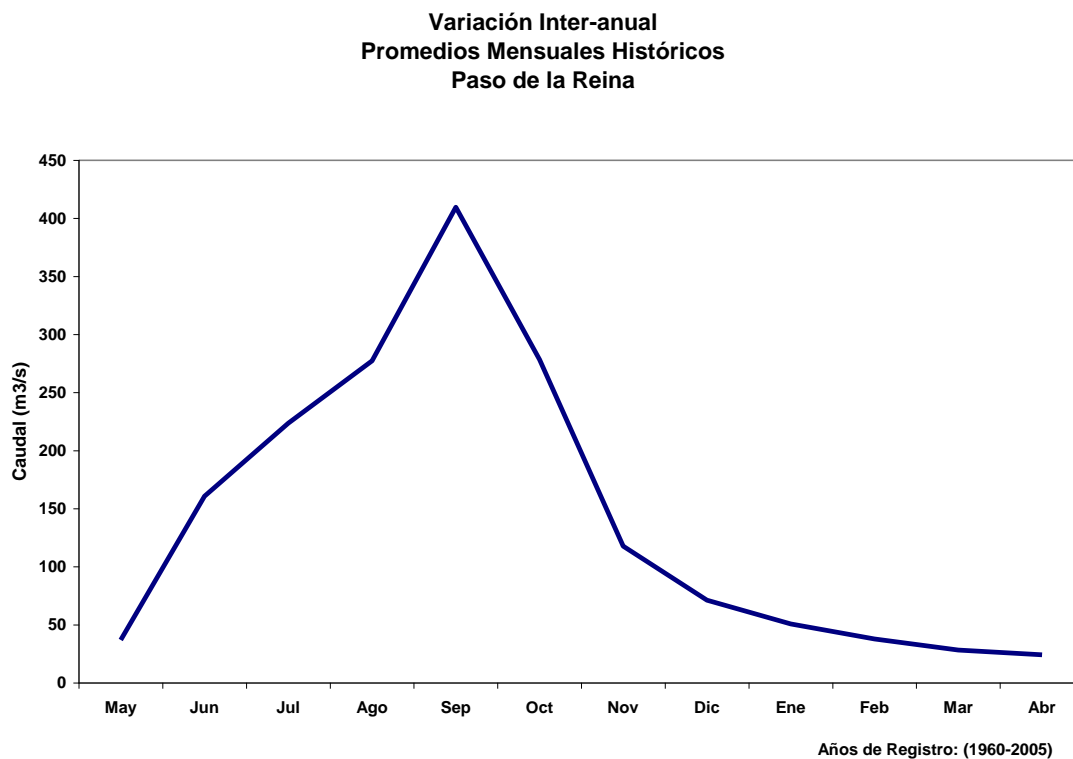


Figura 31. Caudales promedio mensuales para la estación Paso de la Reina.

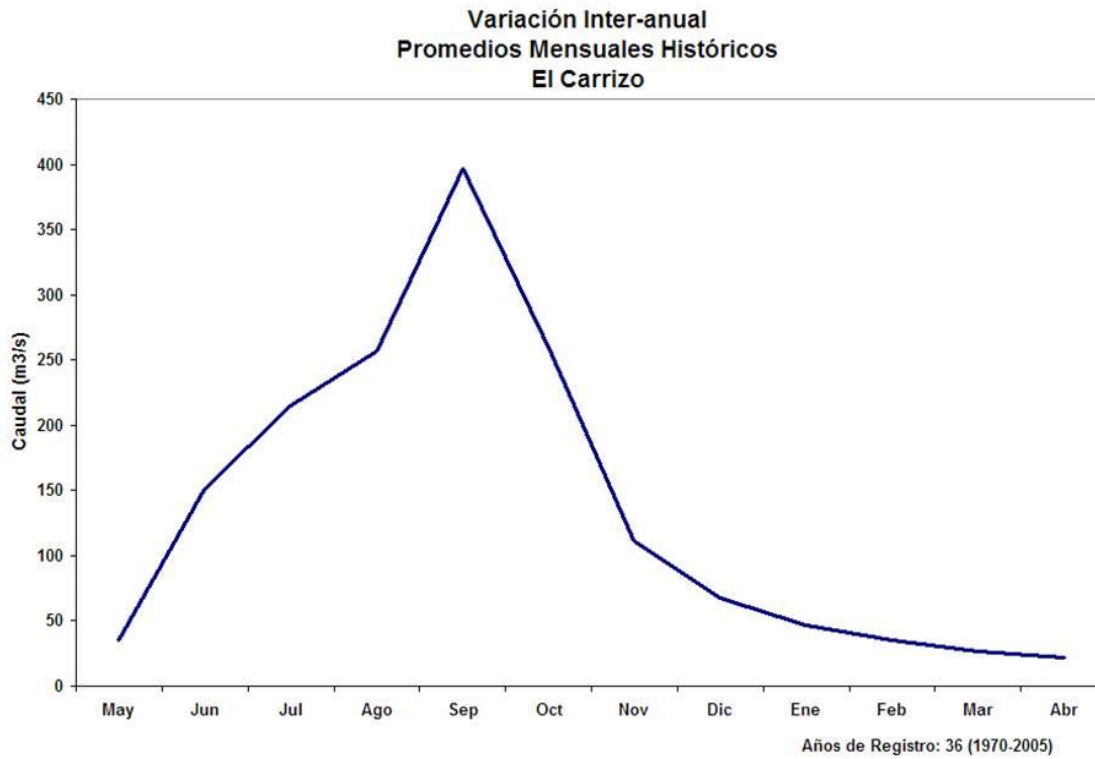


Figura 32. Caudales promedio mensuales para la estación El Carrizo

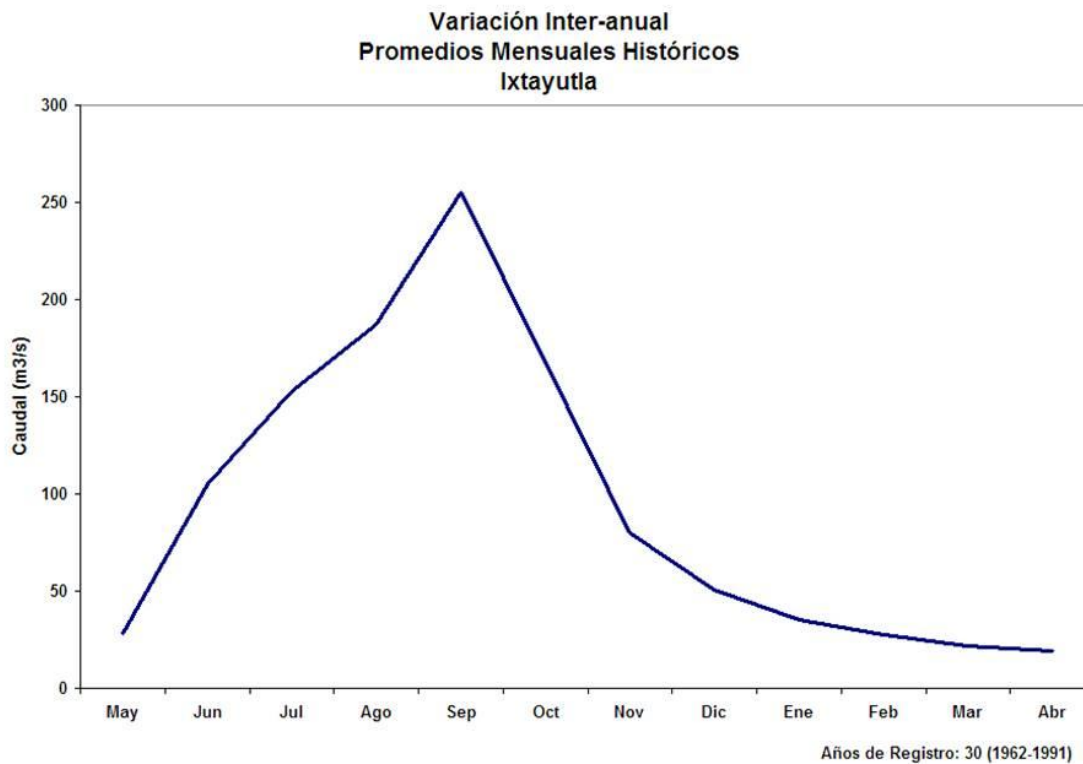


Figura 33. Caudales promedio mensuales para la estación Ixtayutla.

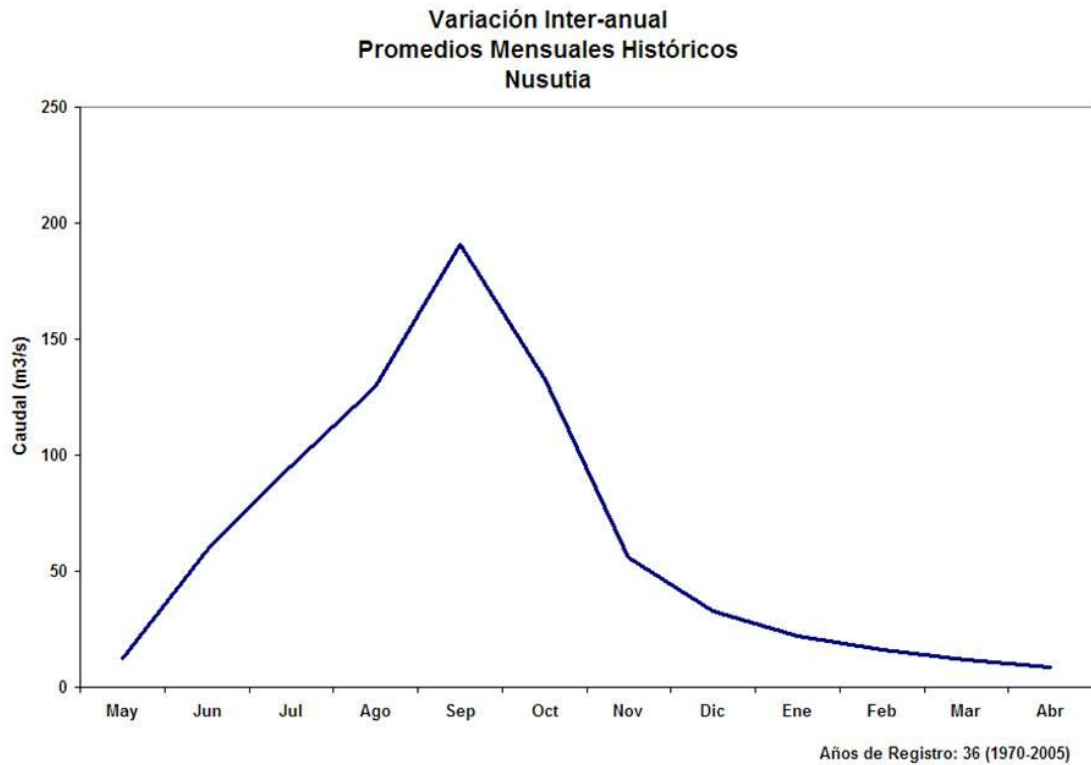


Figura 34. Caudales promedio mensuales para la estación Nusutia.

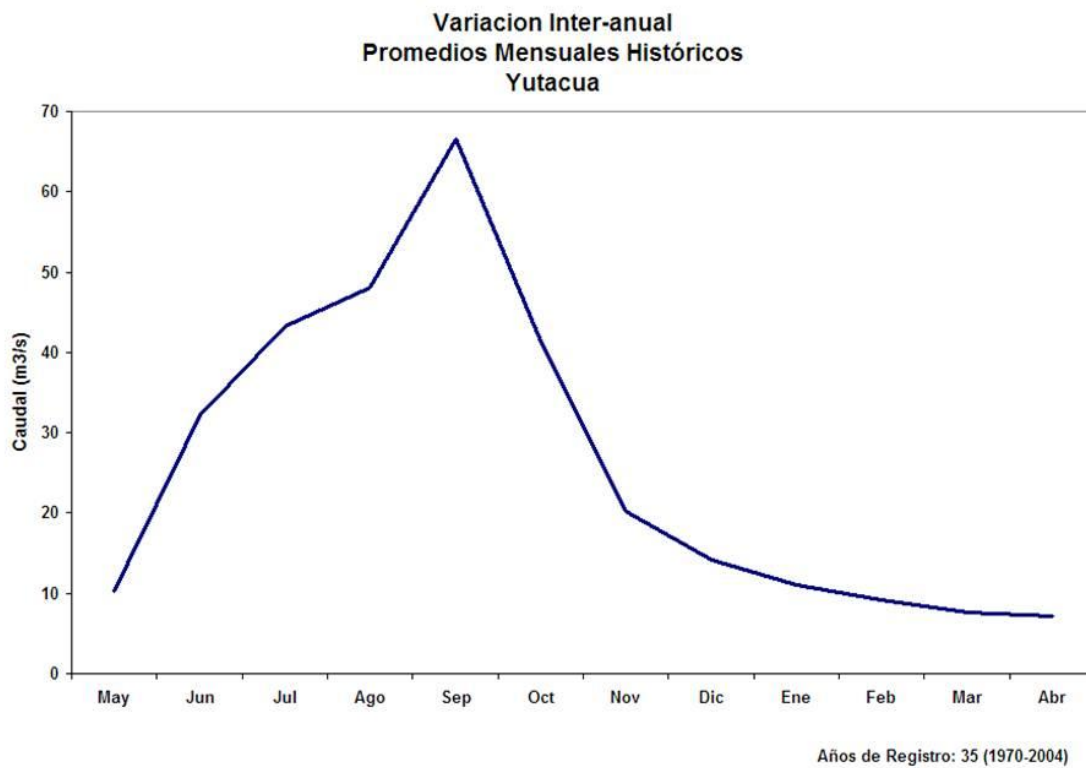


Figura 35. Caudales promedio mensuales para la estación Yutacua.

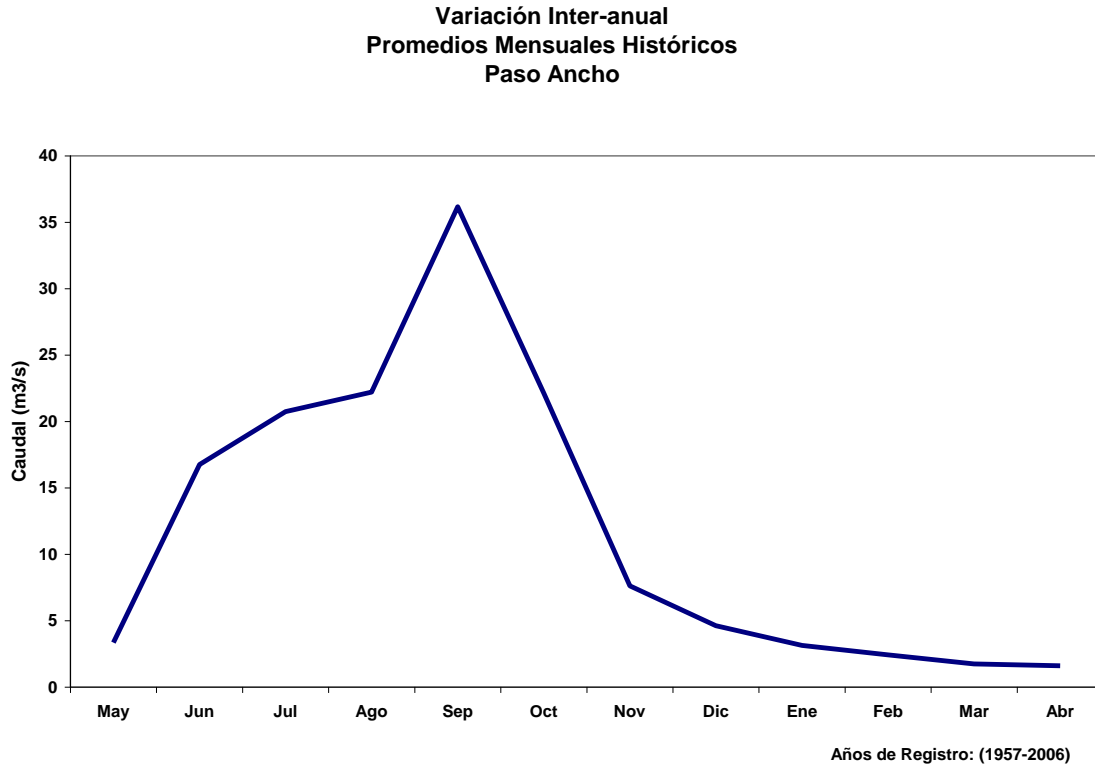


Figura 36. Caudales promedio mensuales para la estación Paso Ancho.

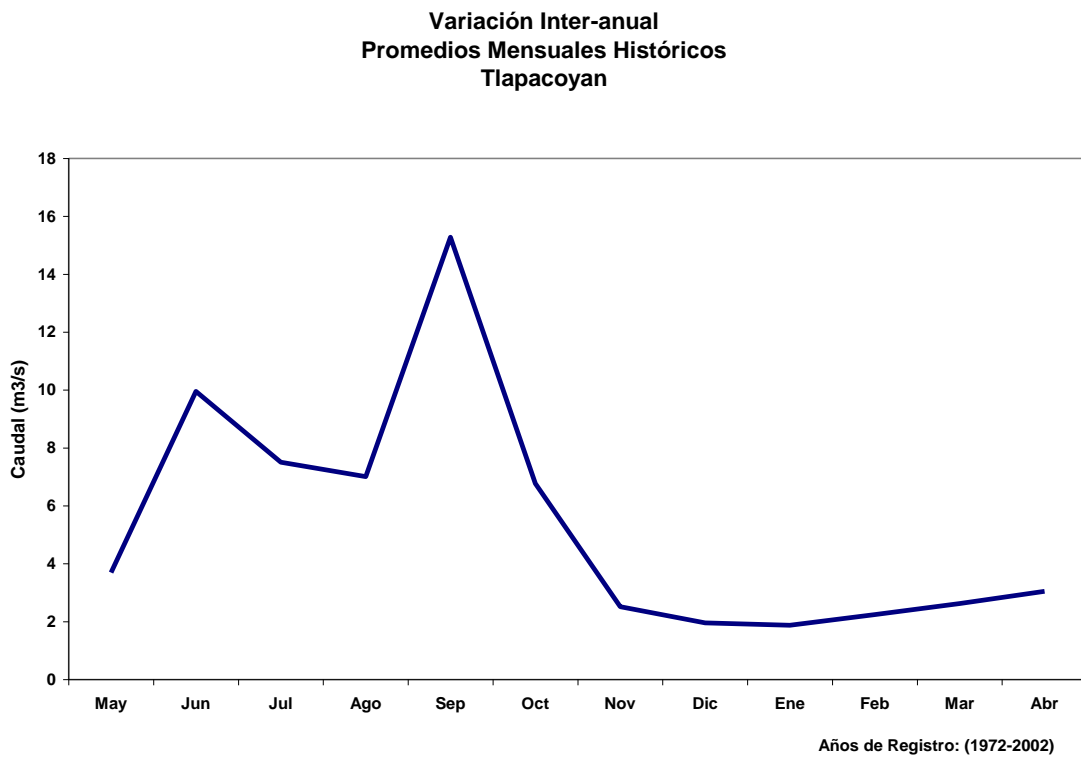


Figura 37. Caudales promedio mensuales para la estación Tlapacoyán.

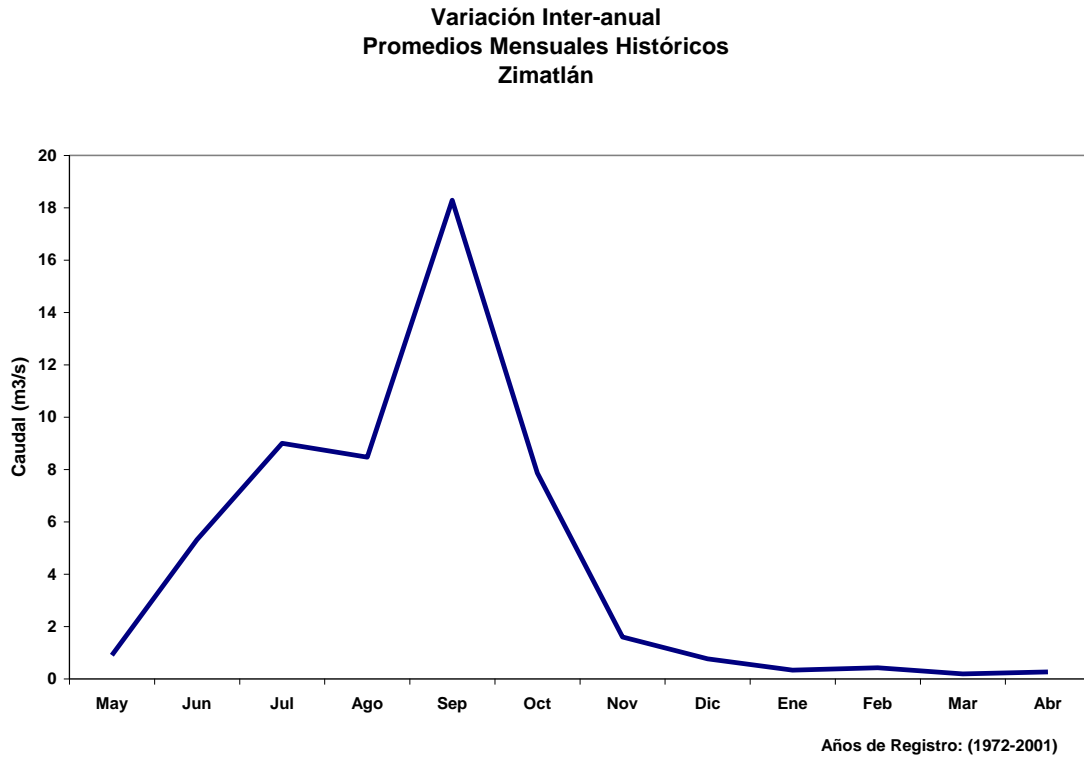


Figura 38. Caudales promedio mensuales para la estación Zimatlán.

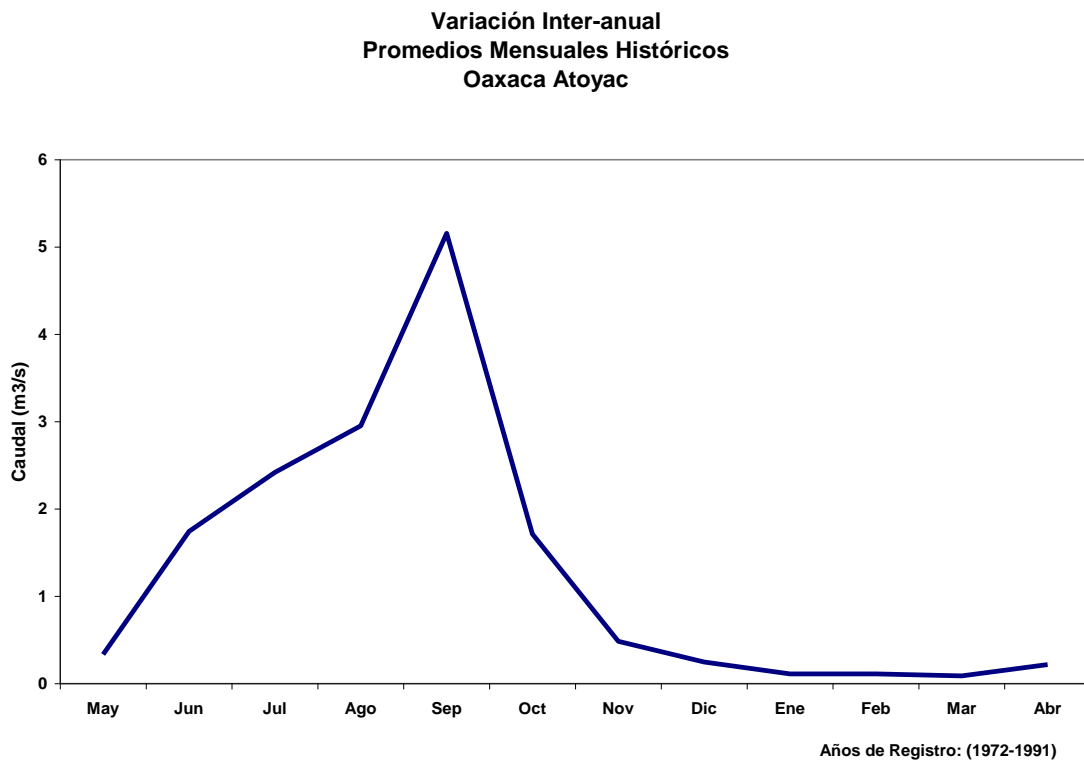


Figura 39. Caudales promedio mensuales para la estación Oaxaca-Atoyac.

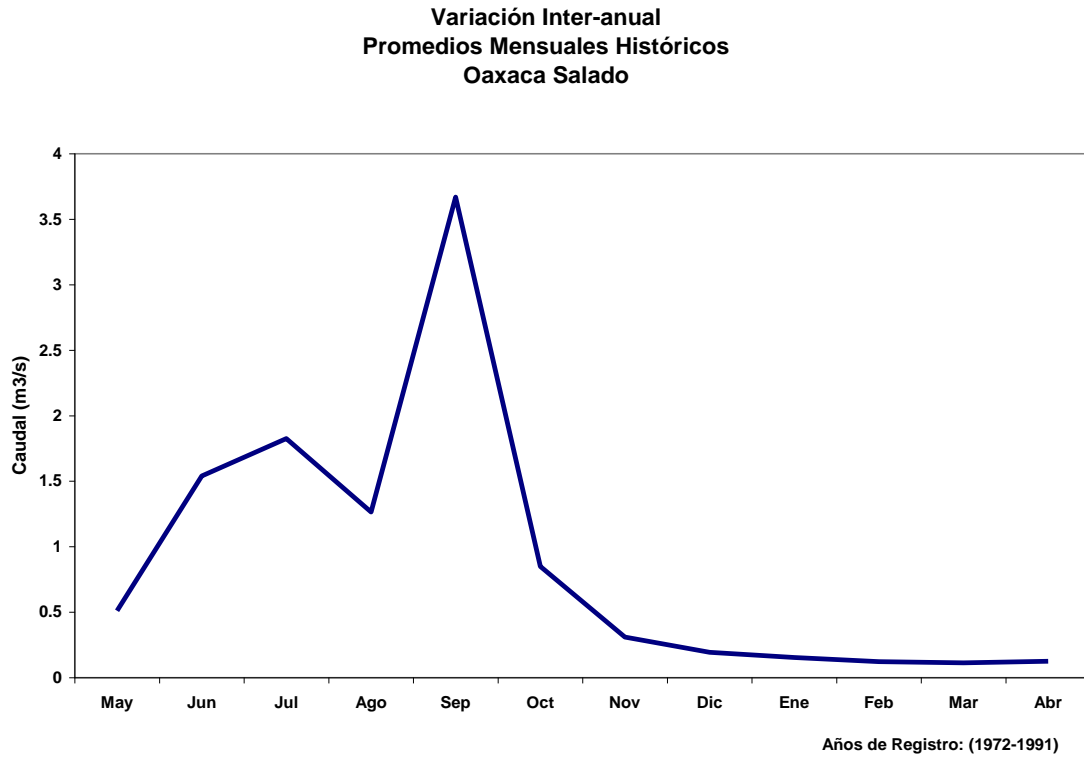


Figura 40. Caudales promedio mensuales para la estación Oaxaca-Salado.

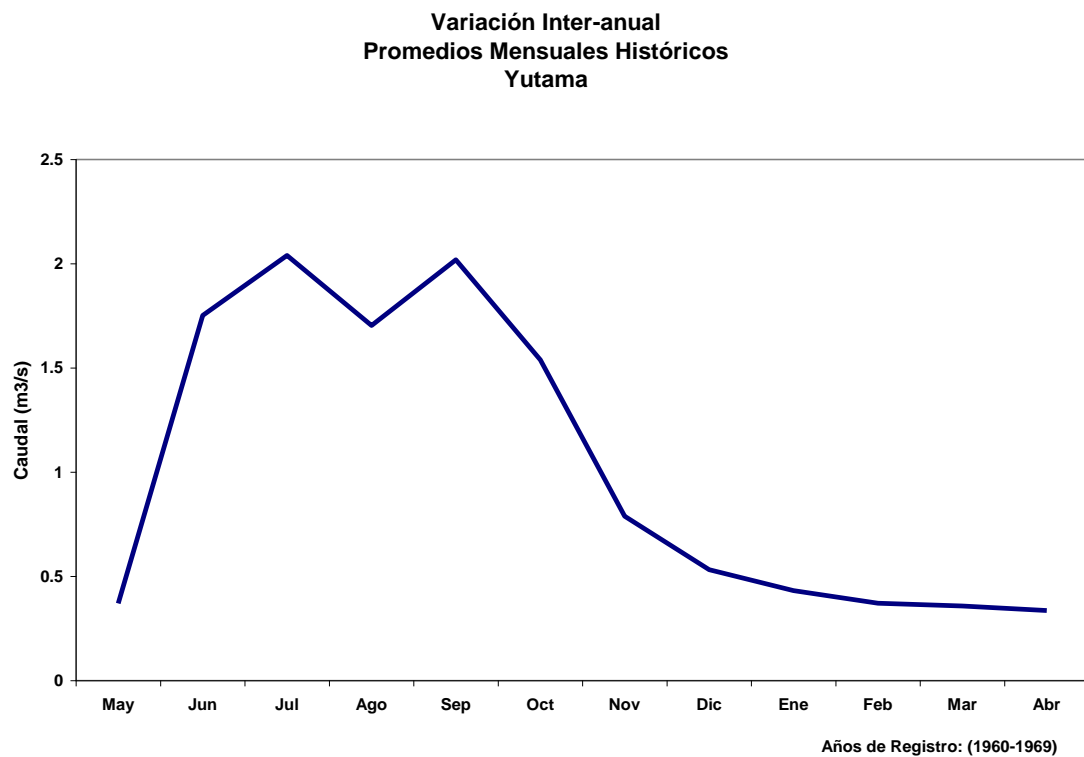


Figura 41. Caudales promedio mensuales para la estación Yutama.

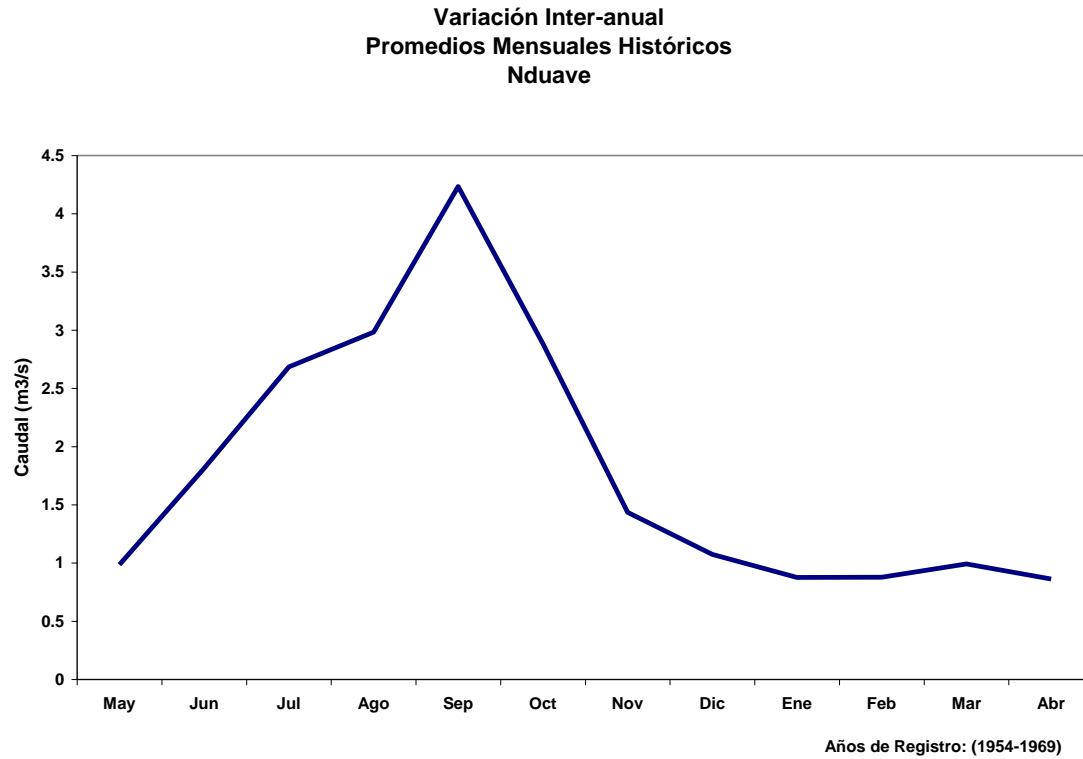


Figura 42. Caudales promedio mensuales para la estación Nduave.

A continuación en la Tabla 10, se muestran los coeficientes de variación junto con los valores de las medianas antes mencionadas y graficadas. Los coeficientes de variación más altos corresponden a los meses donde se presentan las variaciones estacionales por el incremento y disminución de los caudales (junio, julio, agosto, septiembre y octubre).

Tabla 10. Caudales mensuales del grupo 1

Grupo 1	Oaxaca Salado		Oaxaca Atoyac		Yutama		Nduve		Tlapacoyan		Paso Ancho	
	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.
Octubre	0.601	1.84	0.8785	4.267	1.41	1.016	2.115	1.407	4.38	2.321	18.6	0.8333
Noviembre	0.2398	1.308	0.2295	4.091	0.7025	0.8737	1.113	1.321	0.6886	3.591	6.04	0.7326
Diciembre	0.1865	0.7641	0.03615	15.9	0.505	0.3515	0.555	1.635	0.1407	4.433	3.8	0.7105
Enero	0.1336	1.303	0.0205	10.46	0.4	0.2625	0.51	1.137	0.0888	2.202	2.9	0.7241
Febrero	0.07598	1.656	0.0045	48.06	0.355	0.1761	0.45	1.749	0.07828	2.8	2.065	0.9225
Marzo	0.09168	1.566	0.0085	16.48	0.37	0.2095	0.425	1.741	0.05645	3.807	1.5	0.7467
Abril	0.0763	1.68	0.02782	17.12	0.325	0.3	0.45	0.6139	0.06617	4.102	1.4	1.021
Mayo	0.1913	1.052	0.1628	3.818	0.38	0.2237	0.575	0.6	0.2518	3.129	2.9	1.034
Junio	0.7623	1.633	0.1923	9.925	0.5225	4.447	1.32	1.97	2.236	3.648	11.15	1.399
Julio	0.8264	1.839	0.5422	8.205	1.86	1.444	3.015	0.7172	2.798	2.712	15.8	0.843
Agosto	0.5705	1.304	1.104	3.709	1.435	1.225	2.39	0.8201	2.601	1.975	13.7	1.654
Septiembre	0.818	7.287	2.036	6.176	1.685	0.8264	3.235	1.114	5.278	4.467	25.4	1.323
Grupo 1	Zimatlán		Yutacua		Nusutia		Ixtayutla		El Carrizo		Paso de la Reina	
	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.	Medianas m ³ /s	Coef. De Disp.
Octubre	5.305	1.535	36.4	0.6648	118	0.5854	153.5	0.5196	217,50	0,5011	237,30	0.7415
Noviembre	0.9138	2.346	18.58	0.5437	53.65	0.4	78.88	0.317	106,50	0,3957	113,10	0.3596
Diciembre	0.1805	6.74	13.5	0.4481	33.3	0.2873	49.59	0.2747	66,55	0,2998	68,75	0.3437
Enero	0.125	3.026	10.7	0.4743	22	0.267	34.33	0.2237	45,70	0,2681	52,40	0.2525
Febrero	0.0466	6.723	9.11	0.4034	16.05	0.2757	27.45	0.2424	34,45	0,1865	40,21	0.2505
Marzo	0.0061	44.47	7	0.4229	11.8	0.2797	20.7	0.213	26,05	0,2466	28,95	0.3923
Abril	0.02903	9.858	7	0.4471	9.145	0.2164	17.97	0.3074	21,95	0,3798	24,75	0.4083
Mayo	0.4864	2.031	9.36	0.7831	10.9	0.5899	27.35	0.6493	37,00	0,6466	36,11	0,8709
Junio	2.388	2.038	20.95	1.138	50.33	0.9518	88.68	1.013	129,50	0,9241	119,40	1.483
Julio	4.877	1.393	32.5	0.8108	87.7	0.4792	139.5	0.7064	194,50	0,4409	187,70	0.5057
Agosto	3.595	3.032	42	0.8119	119.5	0.7582	178.4	0.7121	241,00	0,6079	255,6	0.8845
Septiembre	7.26	2.844	56.55	1.051	169	0.554	252.9	0.5039	352,30	0,6469	363,00	0.654

7.2.2 Variación inter- anual

La variación inter-anual se refiere al comportamiento histórico del río y se puede observar en los gráficos siguientes obtenidos del software IHA V. 7.1, para cada una de las estaciones hidrométricas.

En las figuras 43 a 54 se incluye la representación gráfica de la variación inter-anual de las estaciones hidrométricas en los afluentes.

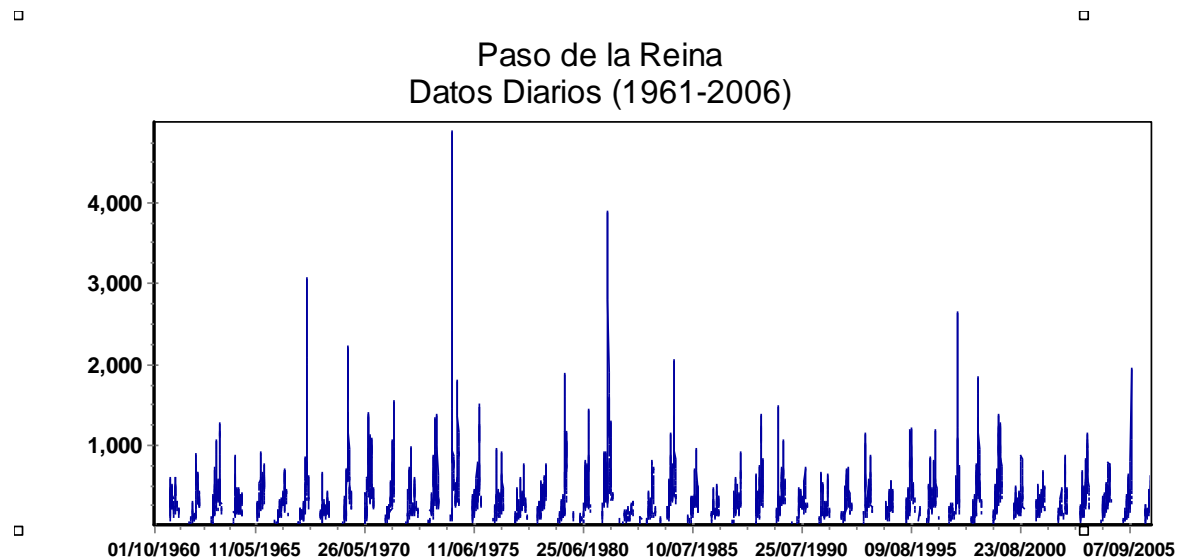


Figura 43. Variación inter-anual para la estación Paso de la Reina.

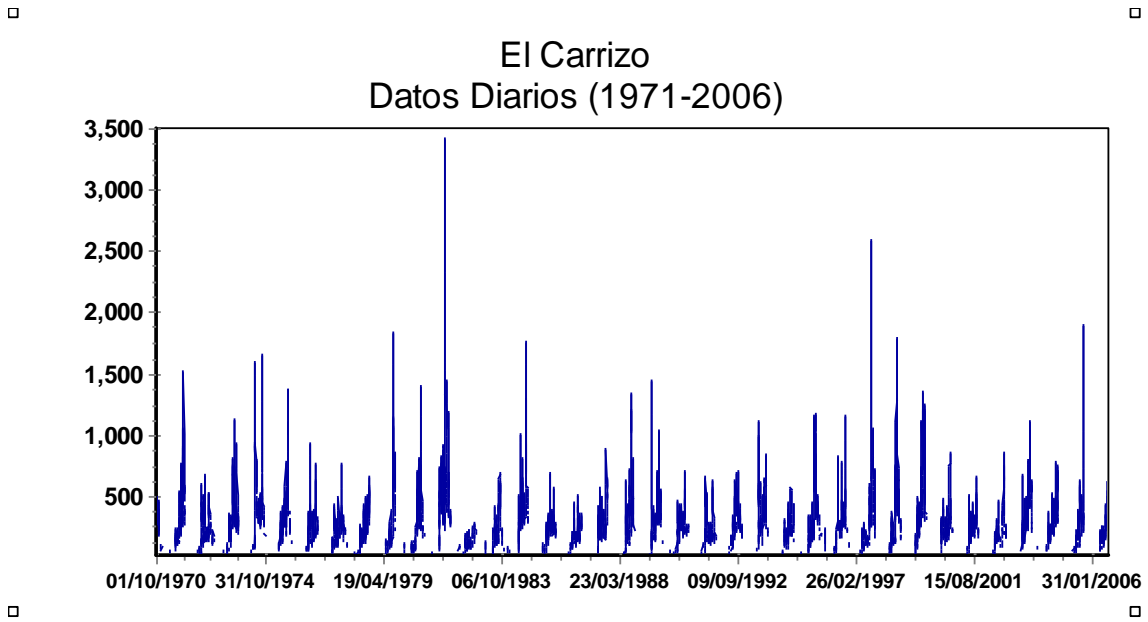


Figura 44. Variación inter-anual para la estación El Carrizo

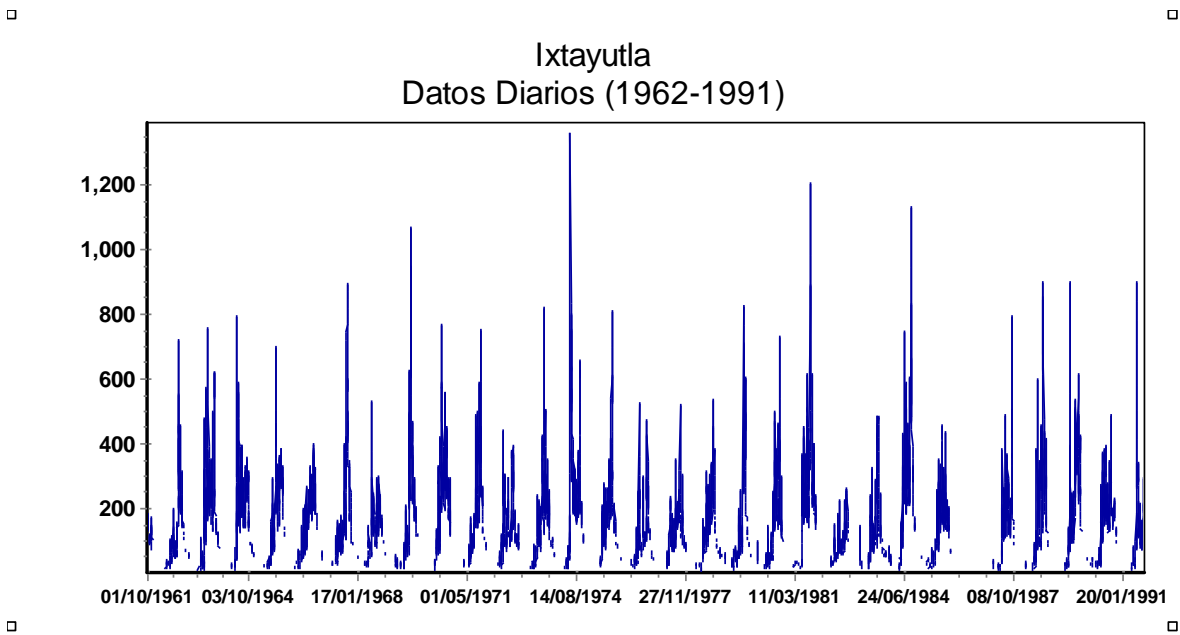


Figura 45. Variación inter-anual para la estación Ixtayutla.

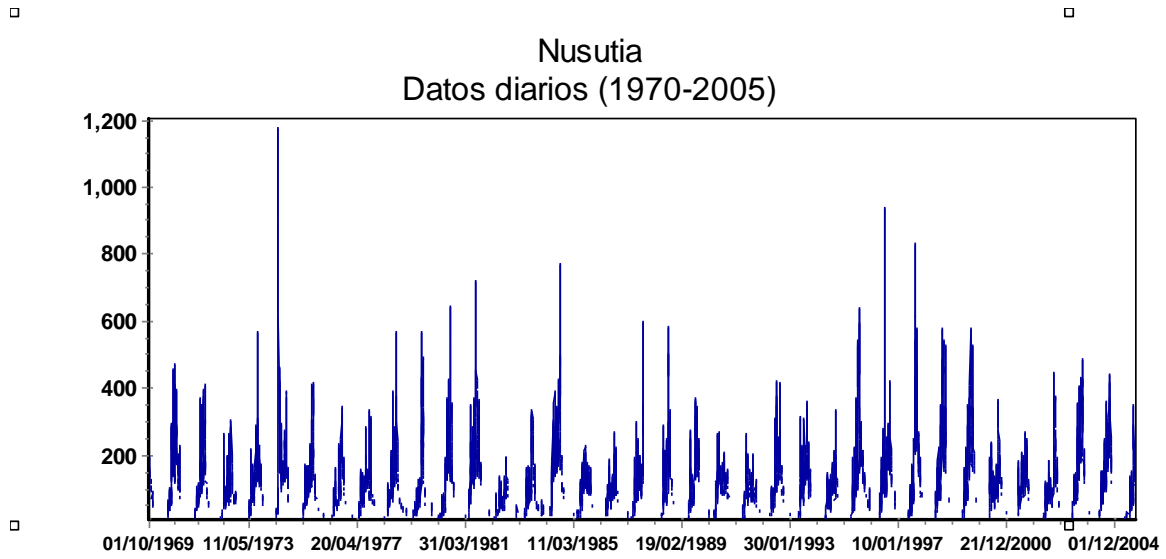


Figura 46. Variación inter-anual para la estación Nusutia.

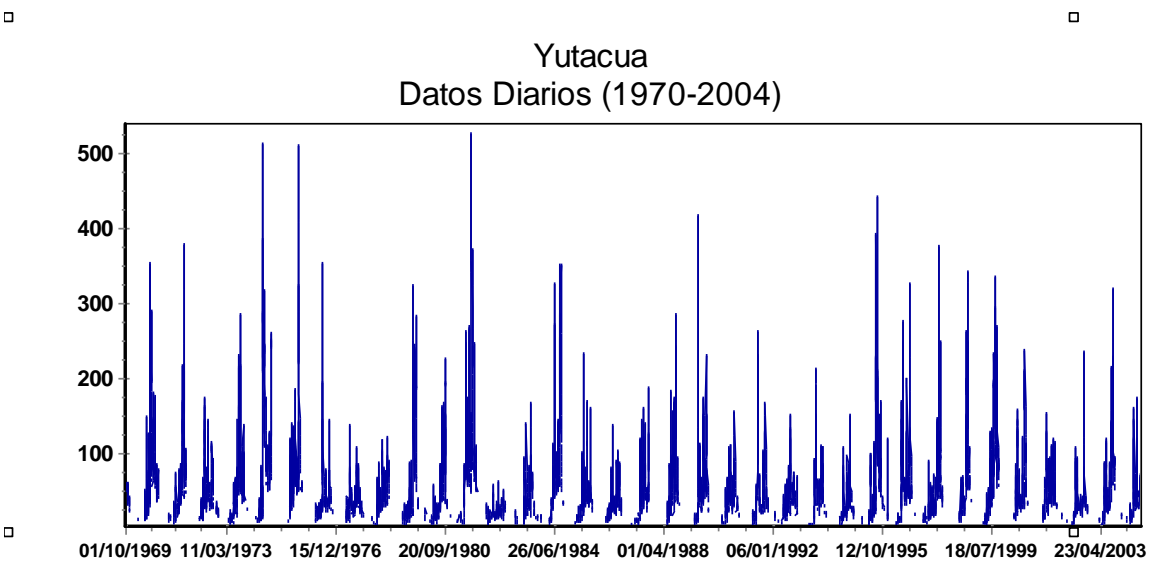


Figura 47. Variación inter-anual para la estación Yutacua.

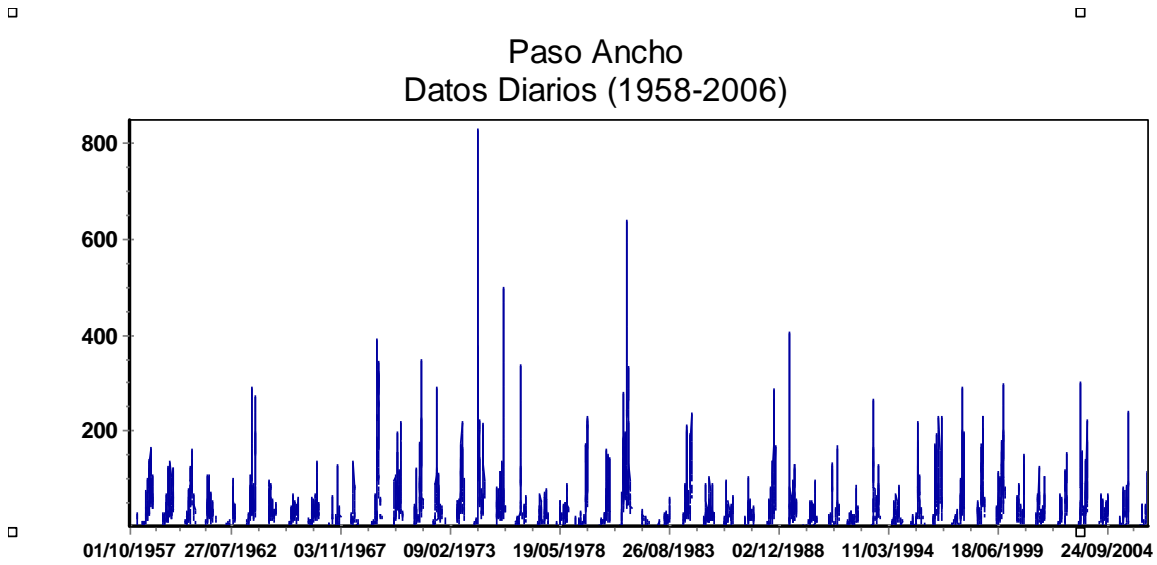


Figura 48. Variación inter-anual para la estación Paso Ancho.

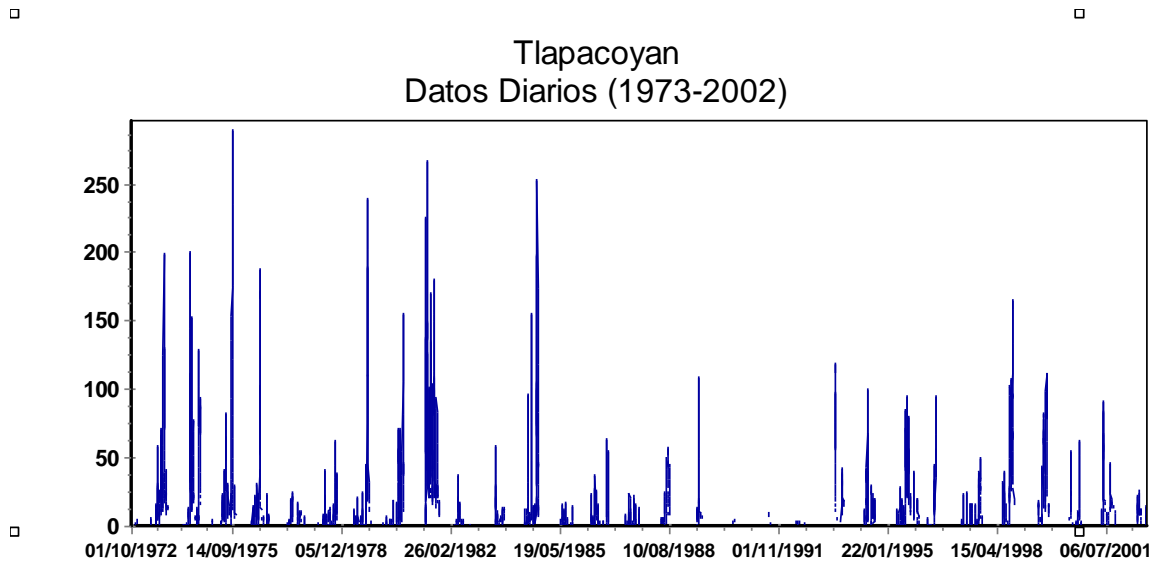


Figura 49. Variación inter-anual para la estación Tlapacoyán.

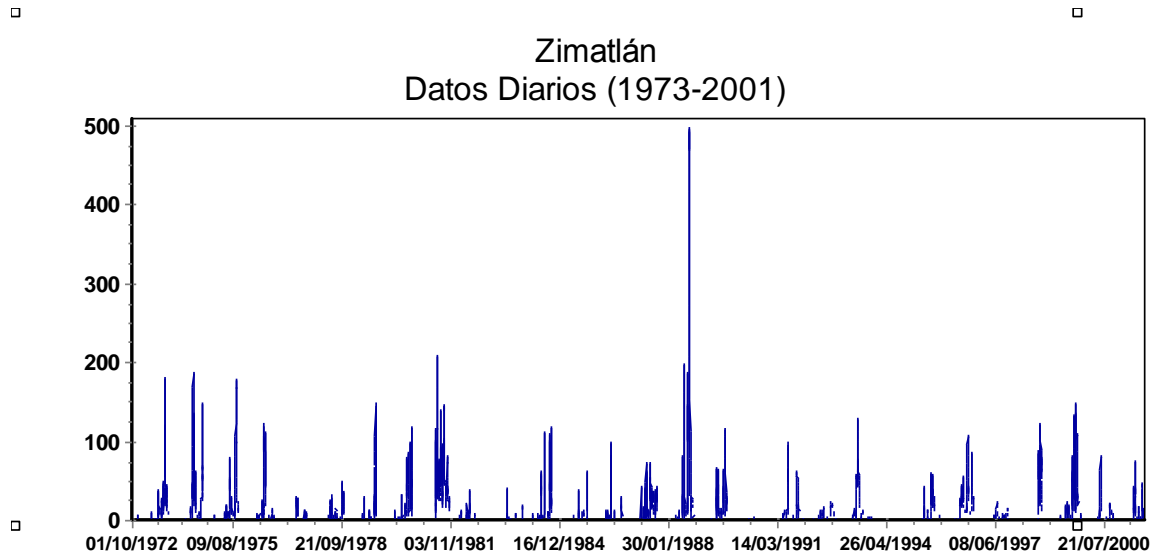


Figura 50. Variación inter-anual para las estaciones restantes.

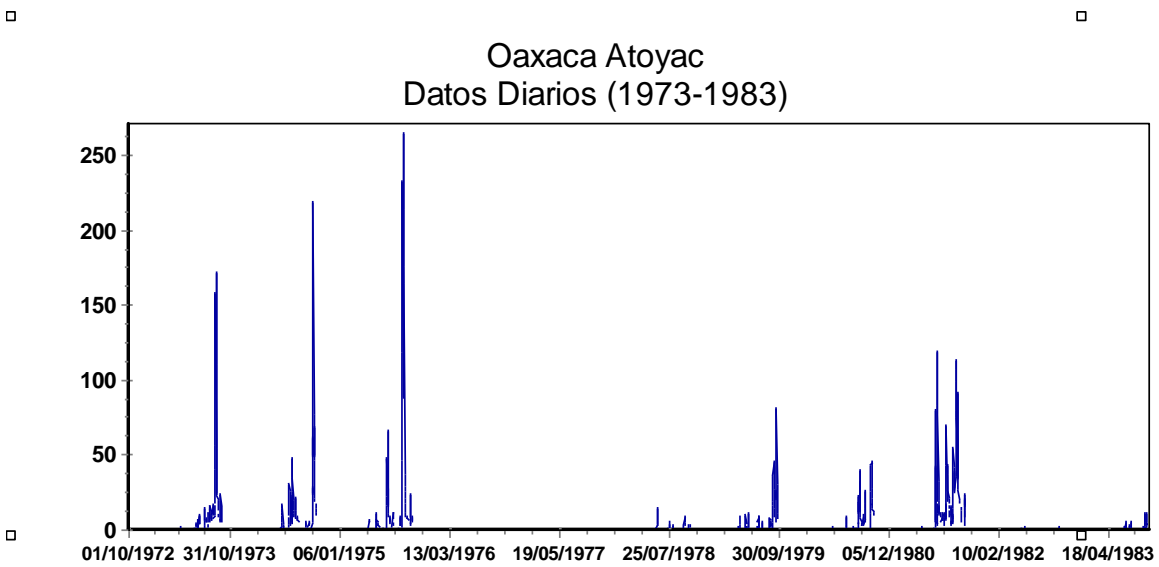


Figura 51. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Atoyac

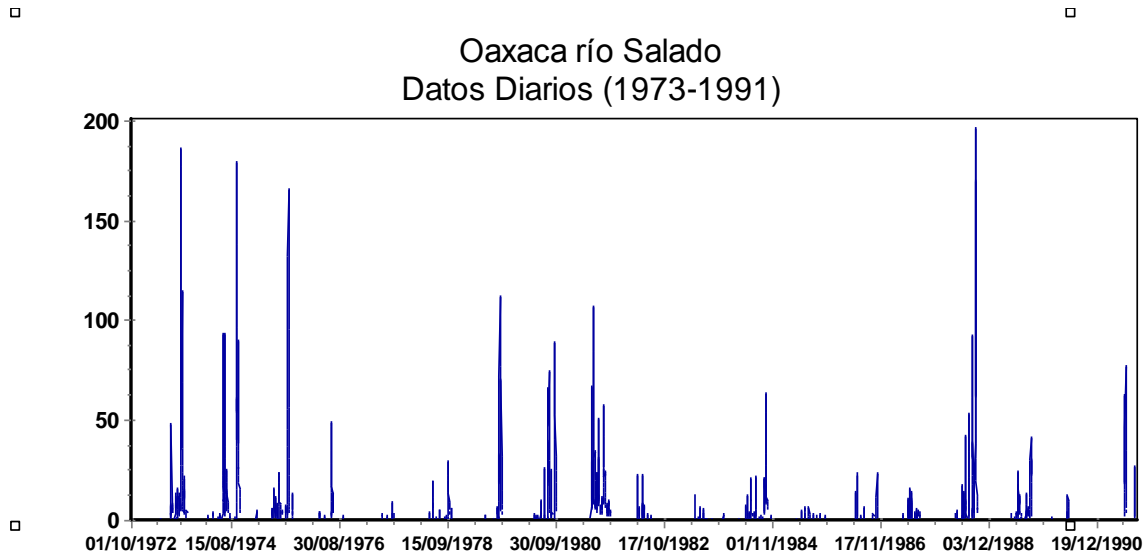


Figura 52. Variación inter-anual para la estación Oaxaca-Salado.

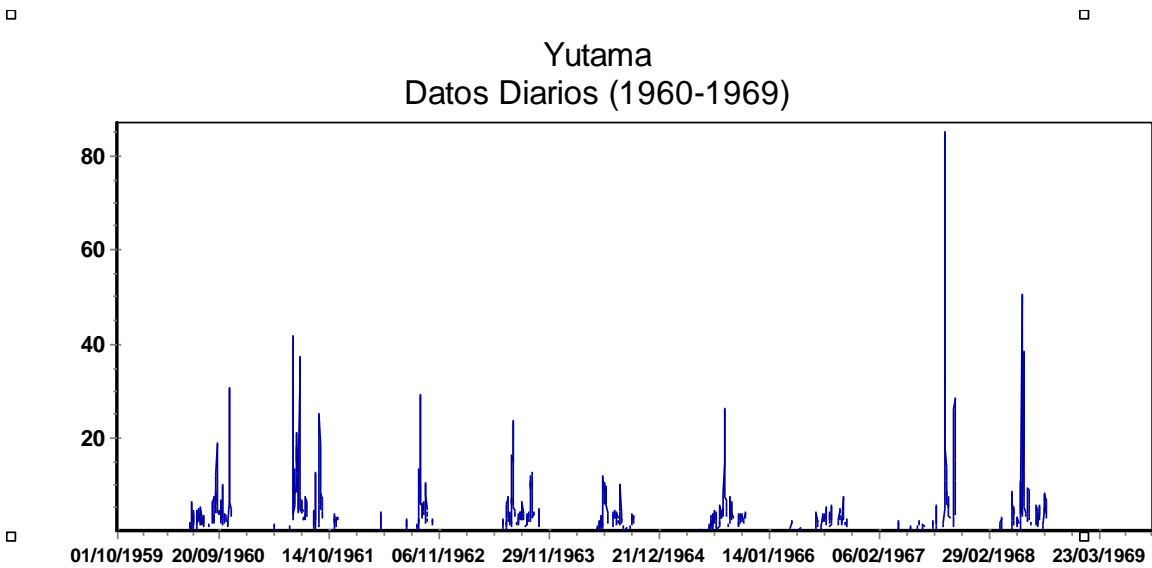


Figura 53. Variación inter-anual para la estación Yutama.

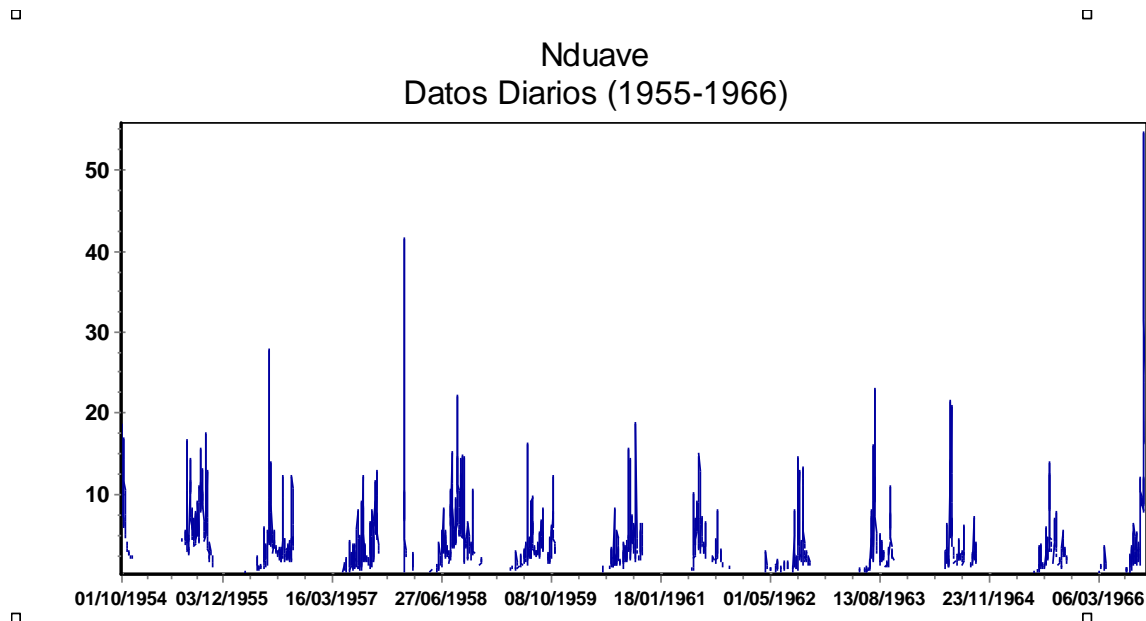


Figura 54. Variación inter-anual para la estación Nduave.

En términos de la magnitud y duración de los caudales para los años de registro se estimaron las medianas para diferentes periodos (1, 3, 30 y 90 días máximos y mínimos) Tabla 11.

Es importante tener en cuenta estos valores, sobre todo identificar el valor máximo o mínimo que ha presentado el río y que se asocie a una condición de estrés ya sea por reducción o abundancia de caudal.

Cabe señalar que, las estaciones El Carrizo y Paso de la Reina, las cuales se ubican en los últimos 60 km antes de la desembocadura, también han sido analizadas por la CFE y sería conveniente reconocer estos valores de magnitud y duración, principalmente en la estación Paso de la Reina, donde se regulará el flujo por un potencial aprovechamiento hidroeléctrico planeado, el cual resultaría en alteraciones en el patrón actual del río (CFE, Inédito).

Tabla 11. Parámetros hidrológicos del grupo 2

Grupo 2	Oaxaca Salado		Oaxaca Atoyac		Yutama		Nduve		Tlapacoyan		Paso Ancho	
	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.
Mínimo 1- día	0.018	1.222	0	0	0.24	0.6146	0.23	1.065	0.009	7.564	0.95	1
Mínimo 3-días	0.021	1.098	0	0	0.2617	0.3631	0.2717	0.7975	0.009383	7.369	1.007	0.894
Mínimo 7-días	0.03111	1.161	0	0	0.2814	0.302	0.3121	0.7414	0.009786	7.117	1.071	0.8452
Mínimo 30-días	0.04215	1.066	0	0	0.3075	0.2967	0.369	0.5644	0.03052	2.787	1.273	0.8901
Mínimo 90-días	0.08628	0.956	0.01012	9.287	0.3673	0.2976	0.4337	1.168	0.06651	2.061	1.86	0.586
Máximo 1-día	49.18	1.823	47.87	2.981	24.95	1.336	20.18	1.217	94.91	1.397	181	0.8895
Máximo 3- días	43.91	1.703	41.38	2.442	18.26	1.021	14.5	0.6363	70.68	1.525	144.5	0.8547
Máximo 7 – días	29.26	1.62	27.33	2.916	13.38	0.6414	11.37	0.4063	54.31	1.72	115.7	0.8014
Máximo 30 - días	9.172	2.249	10.83	2.523	6.088	0.7281	6.152	0.6166	26.35	1.895	55	1.11
Máximo 90- días	4.453	1.986	5.763	2.235	3.353	0.5524	3.62	0.8533	14.72	1.623	30.42	0.9636
Número de días cero caudal	0	0	52	2.543	0	0	0	0	0	0	0	0
Grupo 2	Zimatlán		Yutacua		Nusutia		Ixtayutla		El Carrizo		Paso de la Reina	
	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.	Medianas m3/s	Coef. De Disp.
Mínimo 1- día	0	0	5.58	0.4507	7.265	0.2244	14.13	0.3614	16.3	0.2193	15.74	0.4512
Mínimo 3-días	0	0	5.7	0.4474	7.425	0.2122	14.79	0.3287	16.58	0.2352	16.29	0.5159
Mínimo 7-días	0	0	6.031	0.4299	7.625	0.2103	15.25	0.3077	17.14	0.2388	17.48	0.4313
Mínimo 30-días	0.00246	18.34	6.631	0.399	8.52	0.2588	16.43	0.2873	21.43	0.2926	25.06	0.2946
Mínimo 90-días	0.04659	5.084	7.824	0.4522	11.13	0.2294	20.5	0.2924	28.29	0.2456	32.86	0.3367
Máximo 1-día	108.1	0.7468	263.1	0.5835	431.5	0.5133	754.7	0.5193	1021	0.7082	956.9	0.8511
Máximo 3- días	95.97	0.7983	200	0.6404	383.3	0.4502	582.6	0.5249	849.5	0.7425	825	0.9316
Máximo 7 – días	68.08	0.935	160.6	0.6528	328	0.5185	484.4	0.5301	706.9	0.6385	676.7	0.7451
Máximo 30 - días	35.74	0.9865	97.4	0.8292	219.3	0.4508	320	0.3963	444.6	0.6416	505.1	0.7428
Máximo 90- días	17.34	0.9133	59.01	0.5186	150.9	0.4651	218.8	0.3969	341.4	0.5081	375.7	0.4847
Número de días cero caudal	35	3.157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Por otro lado, también se obtuvo el umbral recomendado por autores como (Richter et al., 1997) para la variabilidad natural, dentro de los percentiles 25 a 75 que en una distribución normal correspondería a mantenerse dentro de un intervalo de más/menos una desviación estándar.

En la Tabla 12 se muestran los umbrales mensuales para todas las estaciones y en la Figura 55 se muestran graficados estos umbrales, incluyendo también las medianas mensuales, a manera de ejemplo, solo para la estación hidrométrica El Carrizo.

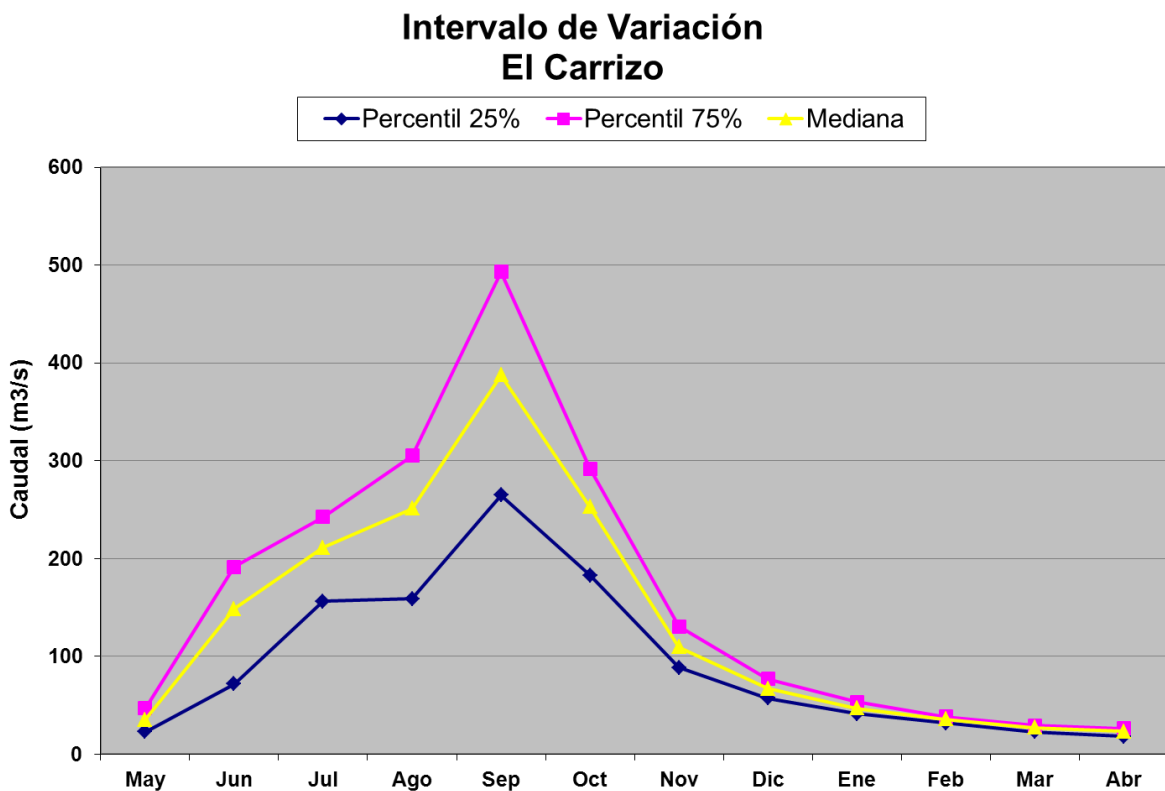


Figura 55. Umbrales mensuales que muestran la variabilidad natural recomendada por (Richter et al., 1997)

Tabla 12. Percentiles 25% y 75% que definen el Intervalo de Variabilidad Natural.

Percentiles	Oaxaca Salado		Oaxaca Atoyac		Yutama		Nduve		Tlapacoyan		Paso Ancho	
	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%
Octubre	0.24	1.346	0.04323	3.792	0.78	2.213	1.188	4.163	0.454	10.62	10.4	25.9
Noviembre	0.1216	0.4352	0.04024	0.9791	0.5413	1.155	0.5975	2.068	0.07949	2.552	4.5	8.925
Diciembre	0.1065	0.249	0.0003158	0.5749	0.45	0.6275	0.36	1.268	0.009705	0.6333	2.8	5.5
Enero	0.0649	0.239	0	0.2145	0.3875	0.4925	0.2625	0.8425	0	0.1956	2	4.1
Febrero	0.05195	0.1778	0	0.2163	0.3375	0.4	0.3113	1.098	0	0.2192	1.42	3.325
Marzo	0.036	0.1796	0	0.1401	0.3225	0.4	0.3	1.04	0	0.2149	1.08	2.2
Abril	0.0468	0.175	0	0.4762	0.285	0.3825	0.3225	0.5988	0	0.2715	0.9	2.33
Mayo	0.1378	0.339	0.00925	0.6308	0.315	0.4	0.45	0.795	0.03293	0.8207	1.7	4.7
Junio	0.2986	1.543	0.01973	1.928	0.3638	2.688	0.6138	3.214	0.431	8.585	6.5	22.1
Julio	0.3275	1.847	0.1177	4.567	0.5775	3.263	1.328	3.49	0.9197	8.508	7.97	21.29
Agosto	0.192	0.9358	0.1677	4.261	0.755	2.513	1.768	3.728	0.692	5.829	7.34	30
Septiembre	0.361	6.322	0.245	12.82	1.396	2.789	1.918	5.523	2.348	25.93	15.8	49.4
Percentiles	Zimatlán		Yutacua		Nusutia		Ixtayutla		El Carrizo		Paso de la Reina	
	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%
Octubre	1.394	9.536	26.55	50.75	91.43	160.5	121.7	201.5	23	46.93	23.98	32.07
Noviembre	0.3204	2.464	15.35	25.45	43.58	65.04	66.93	91.94	71.83	191.5	19.42	27.98
Diciembre	0.0555	1.272	10.85	16.9	27.78	37.35	43.96	57.58	156.5	242.3	23.37	51.19
Enero	0	0.3783	8.425	13.5	18.68	24.55	31.93	39.6	158.8	305.3	82.57	205.4
Febrero	0	0.3133	7.15	10.83	14.24	18.66	23.69	30.34	265	492.9	161.2	253.7
Marzo	0	0.2713	5.875	8.835	10.2	13.5	19.23	23.64	183	292	171.7	353.7
Abril	0	0.2861	5.245	8.375	7.93	9.909	15.73	21.25	88.36	130.5	298.3	508.9
Mayo	0.0969	1.085	6.52	13.85	8.52	14.95	18.47	36.23	57.13	77.08	187.6	346.9
Junio	1.4	6.267	15.35	39.2	27.75	75.65	47.02	136.9	41.2	53.45	97.81	136.1
Julio	1.706	8.501	25.65	52	62.48	104.5	94.66	193.2	31.88	38.3	62.73	78.46
Agosto	1.356	12.25	26.7	60.8	81.9	172.5	116.7	243.8	23.1	29.53	44.27	57.66
Septiembre	3.669	24.32	37.78	97.2	135.3	228.9	181.4	308.8	18.06	26.4	33.89	42.58

7.3 Recursos por proteger y estado de conservación deseado

Las áreas con mayor número de objetos de conservación se distribuyen en agrupaciones relativamente continuas al sur y sureste de la República mexicana (Patricia Koleff et al., 2009). La agrupación a la que pertenece la cuenca del Río Verde, es una agrupación grande que se extiende desde el sur de la Sierra Madre Oriental pasando por Oaxaca, el Istmo de Tehuantepec en la región del Soconusco y parte de la costa del Océano Pacífico hasta Los Altos de Chiapas.

Se calcula que en el estado de Oaxaca, existen alrededor de nueve mil especies de plantas, esto constituye cerca de la mitad de todas las especies existentes del país. En cuestión fauna, se han registrado 246 especies de mamíferos, 701 de aves, mas de 476 de reptiles y 1100 especies de mariposas. (CONABIO - CONANP, 2010)

En las tierras bajas del estado de Oaxaca, se encontraron grandes concentraciones de especies endémicas de mamíferos no protegidos (Patricia Koleff et al., 2009).

Para la cuenca del Río verde se analizó información sobre los recursos por proteger que se encuentran dentro la cuenca, de los cuales sobresalen los de la parte baja.

Se ha reunido información geográfica, corresponde al inventario de especies en la parte baja de la cuenca (60 km antes de su confluencia), realizado por la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, para un estudio de la Comisión Federal de Electricidad (inédito).

De esta forma, las especies de peces y langostinos que representan especies de importancia ecológica y económica por proteger en la parte baja de la cuenca, incluyen las de la tabla 13.

Tabla 13. Especies de peces y langostinos de importancia ecológica.

Peces (18 especies)	Langostinos (12 especies)
<i>Astyanax aeneus</i>	<i>Macrobrachium tenellum</i>
<i>Agonostomus monticola</i>	<i>Macrobrachium michoacanus</i>
<i>Mugil curema</i>	<i>Macrobrachium americanum</i>
<i>Poecilia sphenops</i>	<i>Macrobrachium occidentale</i>
<i>Poeciliopsis gracilis</i>	<i>Macrobrachium hobbsi</i>
<i>Poeciliopsis fasciata</i>	<i>Macrobrachiumdigueti</i>
<i>Centropomus sp</i>	<i>Macrobrachium olfersi</i>
<i>Pomadasis bayanus</i>	<i>Macrobrachium sp</i>
<i>Cichlasoma trimaculatum</i>	<i>Palaemonetes carteri</i>
<i>Oerochromis mossambicus</i>	<i>Atya innocous</i>
<i>Dactyloscopus ammis</i>	<i>Atya margaritacea</i>
<i>Dormitator latrifons</i>	<i>Potimirim mexicana</i>
<i>Eleotris picta</i>	<i>Potimirim glabra</i>
<i>Gobiomorus maculatus</i>	
<i>Gobiomorus polylepis</i>	
<i>Awaous transandeanus</i>	
<i>Sicydium multipunctatum</i>	
<i>Trinectes fonsecensis</i>	

7.3.1 Sitios prioritarios para la conservación

Dentro de la cuenca del Río Verde se identificaron sitios que son de importancia para la conservación, clasificados en tres categorías; que son de: Prioridad media, alta y extrema (CONABIO - CONANP, 2010), Figura 56.

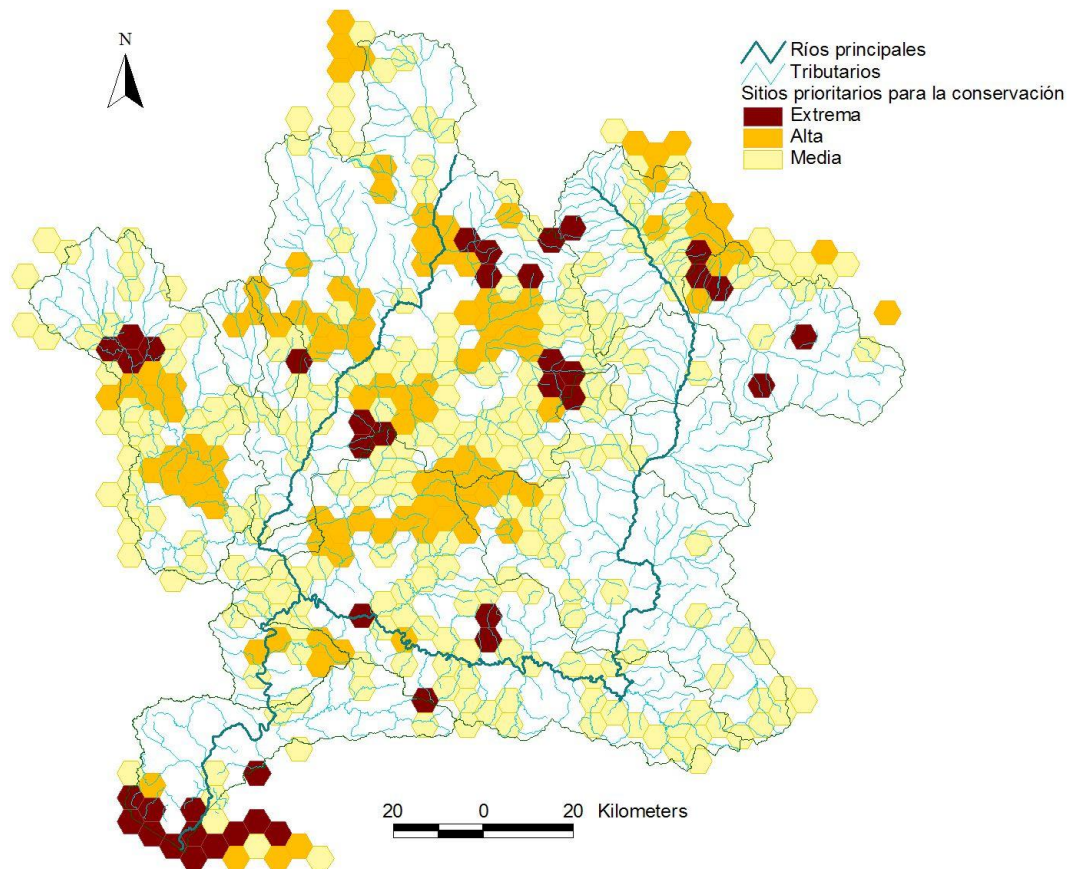


Figura 56. Sitios prioritarios para la conservación. (CONABIO - CONANP, 2010)

7.3.2 Alteraciones Eco-hidrológicas

Cuencas como la del Río Verde, presentan amplias zonas que tienen la mayor concentración de especies endémicas de vertebrados y plantas en el país y

que además, presentan un alto recambio de especies (P Koleff et al., 2008) (Cotler-Ávalos, 2010).

En la figura 57, se puede observar el grado de alteración Eco-hidrológica de las cuencas de México, cabe señalar que la cuenca del Río Verde, presenta un grado de alteración medio.

Se obtuvieron resultados del grado de alteración eco-hidrológica, resultando para la cuenca del Río Verde como MEDIO, integrado bajo los tres indicadores de alteración ponderados que resultaron como sigue (Garrido et al., 2010)(Cotler-Ávalos, 2010):

Red fluvial (ponderación 0.59)	Medio
Zona riparia (ponderación 0.29)	Alto
Cuenca hidrográfica (ponderación 0.14)	Medio

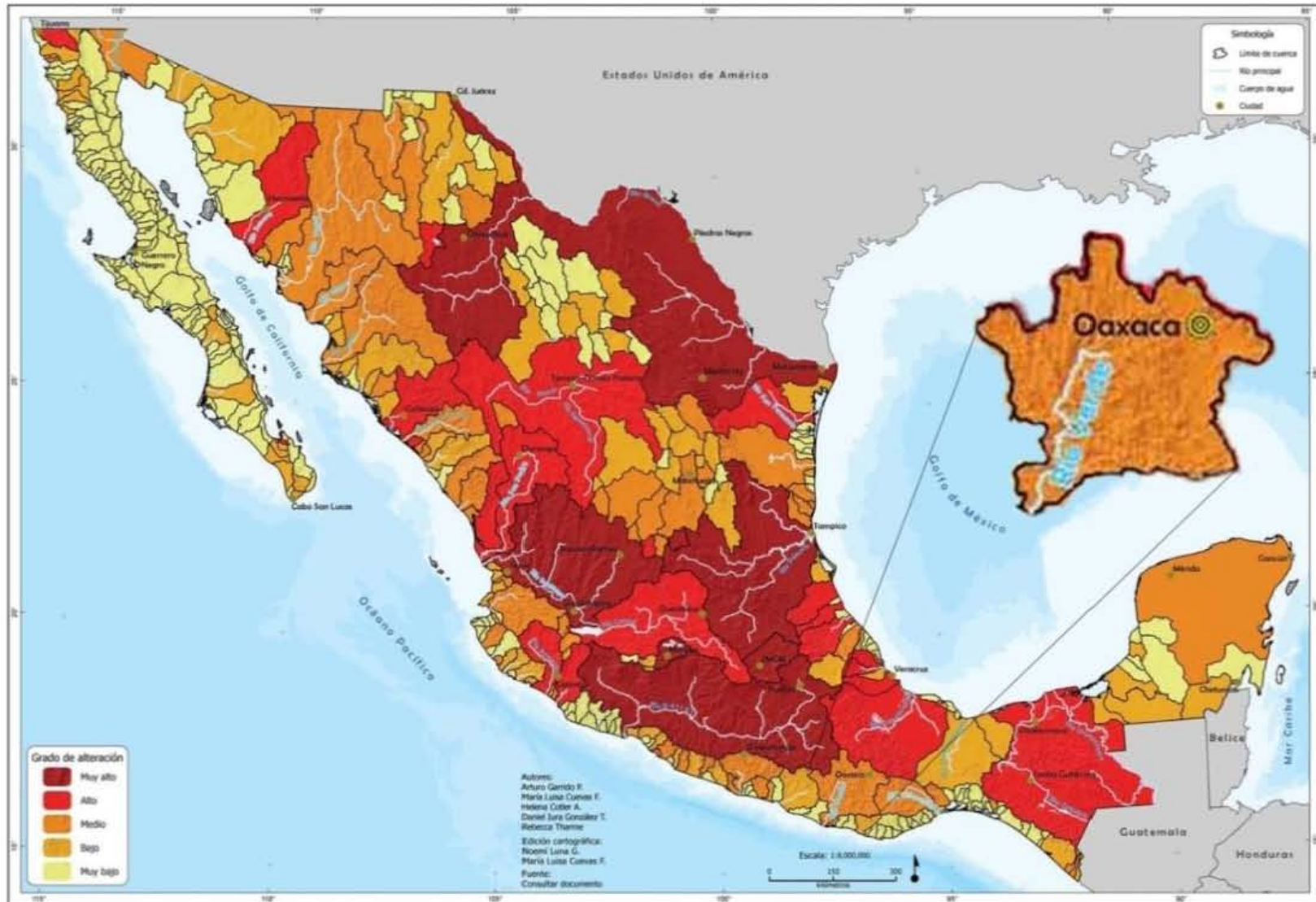


Figura 57. Alteraciones Eco-hidrológicas de las cuencas de México, modificada de Cotler-Ávalos, 2010.

7.3.3 Presión de uso del agua.

El mapa que muestra la presión hídrica y el crecimiento poblacional (Figura 58), se construyó a partir de los datos obtenidos de disponibilidad natural de agua, de la información que proporciona CONAGUA acerca de los volúmenes concesionados para uso agrícola, público-urbano e industrial y de las proyecciones poblacionales 2005-2030 hechas por CONAPO. (Cotler-Ávalos, 2010).

En el mapa se puede observar el nivel de presión hídrica de la cuenca del Río Verde, la cual es baja, <10% del recurso concesionado con una tasa de crecimiento poblacional negativa.

Esto resalta la importancia de conocer y mantener el estado y características naturales de la cuenca, debido al grado de alteración medio que tiene y a su baja presión hídrica.

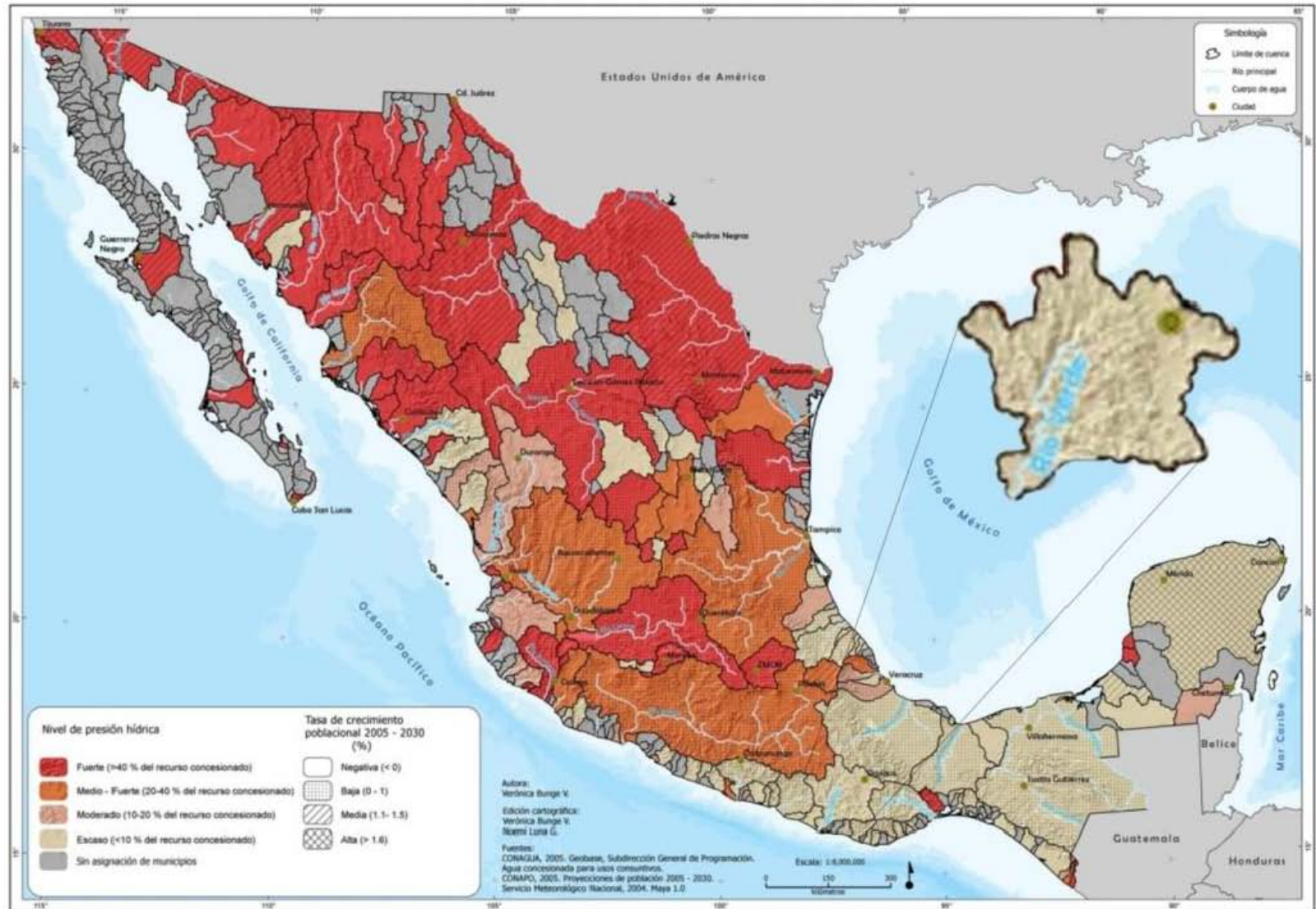


Figura 58. Presión hídrica y crecimiento poblacional en las cuencas de México, modificada de Cotler-Ávalos, 2010.

7.3.4 Estado actual de conservación deseado

El listado de objetivos ambientales para las cuencas hidrológicas de México (DOF-19/06/2007), se presenta como un instrumento para orientar la estimación de caudales ecológicos y conciliar la importancia ecológica de una cuenca y su presión de uso. Este listado resulta de especial aplicación para metodologías hidrológicas y como punto de partida de evaluaciones hidrobiológicas y holísticas, en donde la complejidad del caso, o las condiciones de conectividad requieran de una evaluación del objetivo ambiental más detallada.

Conforme con el proyecto de norma PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011, para calificar las cuencas hidrológicas en términos de su importancia ecológica y la presión de uso por el agua presente en cada una, se consideraron los siguientes criterios:

- Presencia de Áreas Naturales Protegidas (federales, estatales, municipales y certificadas);
- Presencia de humedales de importancia internacional (Convención de Ramsar);
- Presencia de sitios prioritarios para la conservación de los ecosistemas acuáticos epicontinentales (SEMARNAT, 2010)
- Presión de uso para aguas superficiales y subterráneas (esta última para el caso de la Península de Yucatán) conforme a las disponibilidades publicadas en el Diario Oficial de la Federación.

Adicionalmente, se analizó la congruencia de estos criterios con el grado de alteración ecohidrológica potencial de los ríos y corrientes superficiales de México (Garrido et al., 2010).

En la tabla 14 y figura 59, se muestra la clasificación antes mencionada para la cuenca del Río Verde.

Tabla 14. Clasificación en términos de importancia ecológica y presión de uso por el agua. (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011)

No.	Subcuenca	Nombre de cuenca con estudio de disponibilidad	Importancia Ecológica	Presión de uso	Estado de conservación deseado	Objetivo ambiental
1	Oaxaca Atoyac	Río Atoyac-Tlapacoyan	Alta	Media	Bueno	B
2	Oaxaca Salado	Río Atoyac-Salado	Alta	Media	Bueno	B
3	Zimatlán	Río Atoyac-Tlapacoyan	Alta	Media	Bueno	B
4	Tlapacoyán	Río Atoyac-Tlapacoyan	Alta	Media	Bueno	B
5	Paso Ancho	Río Atoyac-Paso de la Reina	Alta	Media	Bueno	B
6	Yutama	Río Sordo-Yolotepec	Alta	Baja	Muy bueno	A
7	Nduave	Río Sordo-Yolotepec	Alta	Baja	Muy bueno	A
8	Nusutia	Río Sordo-Yolotepec	Alta	Baja	Muy bueno	A
9	Yutacua	Río Sordo-Yolotepec	Alta	Baja	Muy bueno	A
10	Ixtayutla	Río Sordo-Yolotepec	Alta	Baja	Muy bueno	A
11	El Carrizo	Río Atoyac-Paso de la Reina	Media	Baja	Bueno	B
12	Paso de la Reina	Río Verde	Alta	Baja	Muy bueno	A

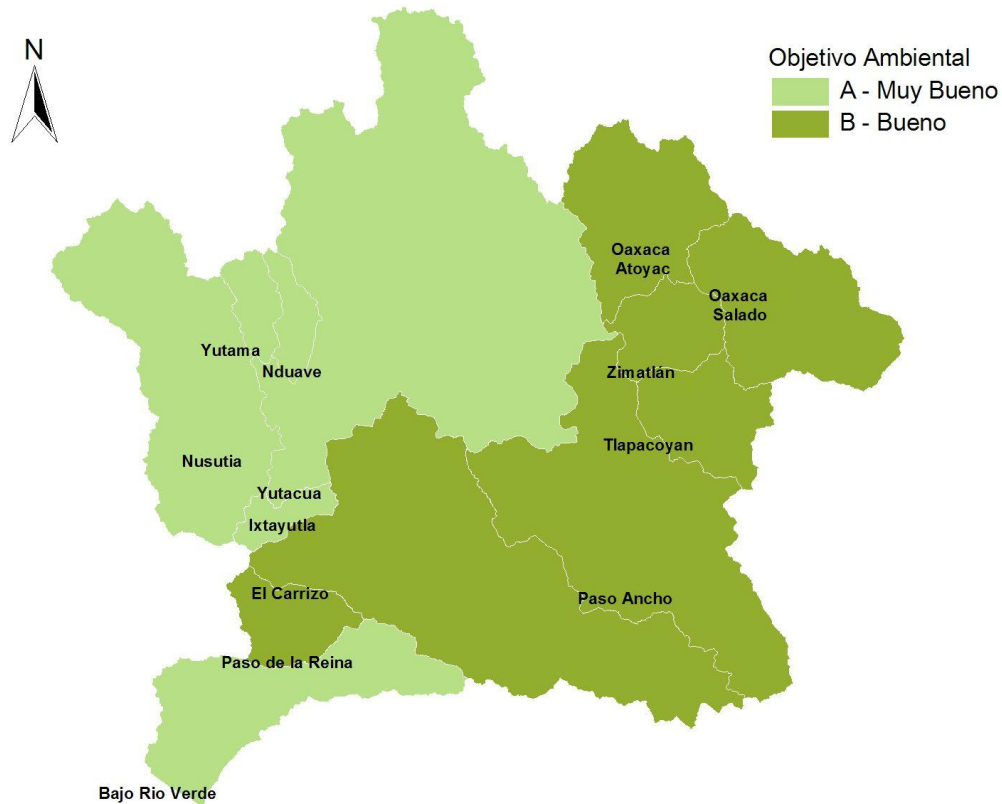


Figura 59. Objetivo ambiental para cada una de las subcuencas del área de estudio. (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011)

Según esta clasificación, se obtuvieron las siguientes recomendaciones de caudal ecológico de acuerdo con (Tennant, 1976), las cuales son recomendaciones de caudales para la protección de la pesca, la vida silvestre, la recreación y los recursos ambientales relacionados y también se obtuvieron los valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales según la WWF, como lo indica la norma (tabla 15).

Tabla 15. Aplicación de la Norma de Caudal tomando como ejemplo la E.H Paso de la Reina (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011)

Aplicación de la norma según Tennant para la E.H. Paso de la Reina. CMA= 161.5 m ³ /s					
Criterios cualitativos para fijar caudales ecológicos	Objetivo Ambiental	Caudales recomendados (en relación al escurrimiento medio anual)		Caudales recomendados (en relación al escurrimiento medio anual)	
		Estiaje		Avenidas	
Intervalo óptimo	A	96.66	161.5	96.66	161.5
Excepcional		64.44		96.66	
Excelente		48.33		80.55	
Aplicación de la norma según la WWF para la E.H. Paso de la Reina. CMA= 161.5 m ³ /s					
OBJETIVO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACION	CAUDAL ECOLÓGICO (>40% CMA y EMA)			
A	Muy bueno	≥64.44 m ³ /s >2,037 Mm ³ /año			

7.4 Estrategia de caudales ecológicos

Para la estrategia de caudales ecológicos, utilizando la metodología IHA-RVA, se recomienda para cada estación establecer los umbrales mensuales en el percentil 10 para caudales mínimos por extracción del recurso, sobre todo en años secos e incrementarlo de forma adaptativa (conforme a la disponibilidad de agua y respuesta del ecosistema acuático) durante los años medios (25) y lluviosos (50). En la tabla 14 se señala un ejemplo para las estaciones Paso de la Reina y El Carrizo. En el SIG se incluyeron en cada punto de control o estación hidrométrica.

Tabla 16. Valores umbrales de dos estaciones: Paso de la Reina y El Carrizo, para la estrategia de caudales Ecológicos.

MES\Percentil	Paso de la Reina					El Carrizo				
	Umbrales de TNC(Percentiles en m ³ /s)									
	Año seco		Año medio		Año lluvioso		Año seco		Año lluvioso	
	10	10	25	10	50	10	10	25	10	50
Enero	34.82	34.82	44.27	34.82	50.02	33.10	33.10	41.20	33.10	45.70
Febrero	25.98	25.98	33.89	25.98	37.41	25.46	25.46	31.88	25.46	34.45
Marzo	21.17	21.17	23.98	21.17	27.79	20.39	20.39	23.10	20.39	26.05
Abril	15.80	15.80	19.42	15.80	23.33	14.68	14.68	18.06	14.68	21.95
Mayo	19.25	19.25	23.37	19.25	33.31	18.60	18.60	23.00	18.60	37.00
Junio	53.47	53.47	82.57	53.47	132.70	51.92	51.92	71.83	51.92	129.50
Julio	122.50	122.50	161.20	122.50	195.10	116.50	116.50	156.50	116.50	194.50
Agosto	133.40	133.40	171.70	133.40	254.20	128.10	128.10	158.80	128.10	241.00
Septiembre	209.00	209.00	298.30	209.00	355.60	180.60	180.60	265.00	180.60	352.30
Octubre	158.40	158.40	187.60	158.40	244.50	140.40	140.40	183.00	140.40	217.50
Noviembre	74.90	74.90	97.81	74.90	115.20	67.37	67.37	88.36	67.37	106.50
Diciembre	48.83	48.83	62.73	48.83	68.78	47.85	47.85	57.13	47.85	66.55

En el caso de descargas superiores, se recomienda el umbral del percentil 90 sobre todo cuando se trate de generación de energía que puede descargar caudales superiores diarios.

7.5 Sistema de Información Geográfica

Esta herramienta está disponible para consultar información a nivel de cuenca y en cada uno de los puntos de importancia estudiados. A continuación se muestra la estructura y los componentes del SIG. (incluido en CD-ROM).

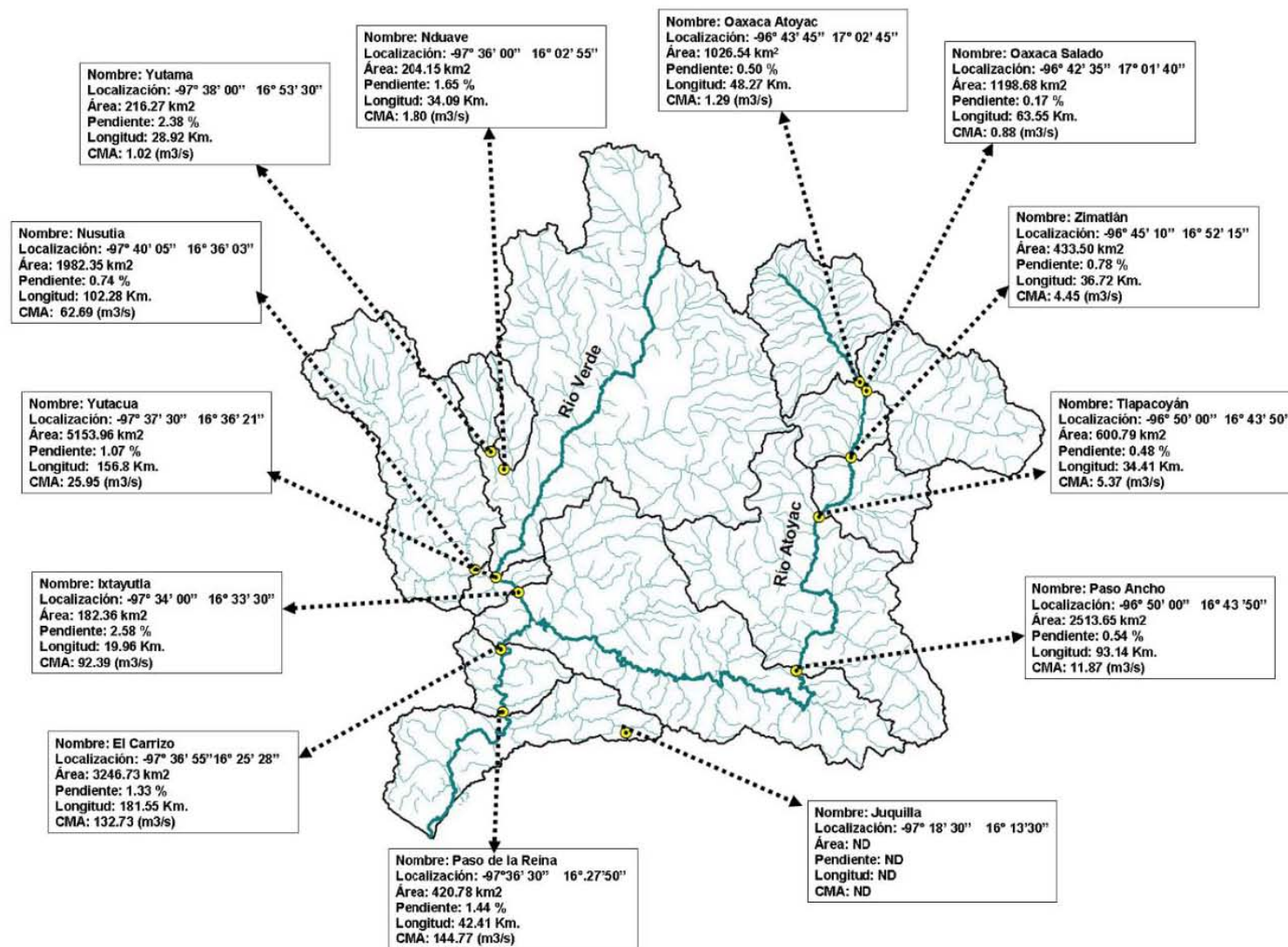


Figura 60. Estructura del SIG

8. Discusión de resultados

Características físicas y espaciales

La pendiente es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta. Es decir si se tienen dos cuencas con la misma forma y área, pero con diferente pendiente del cauce principal, se producirá una respuesta más rápida y un caudal mayor en aquella cuenca con mayor pendiente ante una tormenta presentada, por ejemplo, La subcuenca donde se ubica la EH Ixtayutla, tendrá una respuesta mayor, ya que se calculó una pendiente de 2.58%.

Otros aspectos importantes a considerar con los valores de las pendientes, es que existe mayor arrastre de sedimentos en las partes donde la pendiente es pronunciada y una deposición de estos en tramos donde la pendiente es menor, por lo tanto en la parte alta y media de la cuenca del Verde, con pendientes que van desde 0.78 hasta 2.58%, se presentará un mayor transporte, mientras que aguas abajo de la estación Paso de la Reina, con valores mínimos de pendiente de 0.08% será una zona de depósito de sedimentos.

Una efecto de la pendiente es que da forma a los ríos, se puede notar en secciones donde la pendiente es pronunciada, que se tienen tramos rectos, en el cauce principal, desde su nacimiento hasta el kilómetro 180 y de manera contraria a partir de este punto hasta la desembocadura, donde la pendiente es menor, se pueden observar formas de meandros y pequeñas

islas dentro del río. Estos análisis de pendiente son reconocidos al momento de la planeación de un aprovechamiento, como son las presas hidroeléctricas ya que utilizan la energía que da la pendiente para que las turbinas puedan generar a la mayor capacidad posible.

Conocer el orden de las corrientes ayuda a mantener la conectividad en los ríos la cual tiene implicaciones ecológicas de suma importancia, en la cuenca se tienen; una corriente de segundo orden, tres corrientes de tercer orden, cuatro corrientes de cuarto orden y cinco corrientes de quinto orden, esto, según la división por secciones con la que se trabajó. Corrientes como Oaxaca-Salado, Oaxaca Atoyac, Yutama, Nduave, Zimatlán y Tlapacoyán de órdenes entre 2 y 4, se conectan al sistema durante la época de lluvias.

En el aspecto energético, relacionando el orden con la pendiente de las corrientes, se puede decir que, donde se tiene un cauce de orden mayor y una pendiente pronunciada, resulta una sección en la cual se puede obtener un mayor aprovechamiento de energía, esta característica es importante ya que se pueden considerar estos tramos para tener un mejor manejo y mantener las fluctuaciones y la variación de manera natural, si se llegara a presentar una alteración sobre el río.

Características Hidrológicas

De los resultados de la variación inter-anual mensual, los hidrogramas muestran una condición natural de referencia con las variaciones estacionales de lluvia y estiaje, además de la frecuencia y duración de los

caudales medios en los gráficos diarios. En referencia a estas observaciones, para la mayoría de las estaciones hidrométricas, la época de estiaje se inicia entre los días 296 y 301 correspondientes al periodo entre el 21 y 31 de Octubre, mientras que la época declarada de lluvias se observa entre los días 155 y 160 correspondientes a 3 y 7 de junio.

De los resultados tabulares obtenidos al correr las estaciones hidrométricas en el software IHA 7.1, los coeficientes de variación más altos corresponden a los meses donde se presentan las variaciones estacionales por el incremento y disminución de los caudales (junio, julio, agosto, septiembre y octubre), periodos en los que los eventos extremos tienen influencia.

La magnitud y duración de los caudales históricos que representan la frecuencia de años secos, medios y lluviosos, se observa en los hidrogramas de variación Inter-anual diaria de IHA 7.1. Actualmente en ambos hidrogramas para cada estación, no se observan alteraciones asociadas a extracciones importantes o presencia de infraestructura hidráulica.

Sin embargo, en la operación de alguna infraestructura hidráulica deben tenerse en cuenta los caudales mínimos y máximos de distintos periodos de interés, considerando su magnitud, duración, estacionalidad y tasa de cambio, porque ejercen estrés en el sistema natural o bien representan un momento clave para el inicio de algunos procesos naturales, migración o movimiento en la corriente, conectividad de hábitats laterales y zonas riparias para alimentarse o reproducirse.

Los caudales mínimos y máximos de periodos 30 a 90 días, se asocian principalmente con la duración de las estaciones de estiaje y lluvias, por lo que la magnitud y variación de este caudal es recomendable que se mantenga dentro de un intervalo de más menos una desviación estándar o entre los percentil 25 y 75, sobre todo para la época de estiaje y por medio del monitoreo se realicen los ajustes para determinar la frecuencia con que puede extraerse, por ejemplo en el caso de presas para abastecimiento público o liberarse más caudal, como sería por la generación de energía diaria.

Los caudales mínimos y máximos de otros periodos (1, 3 y 7 días), pueden tomarse como referencia para reconocer las condiciones extremas que se han presentado en el río en el periodo de registro analizado, que pueden causar estrés a las comunidades acuáticas.

Características ambientales y de conservación

Las especies de peces y langostinos reconocidas por su importancia ecológica y económica, tienen una relación estrecha con las características físicas e hidrológicas de la cuenca, por tanto, mantener estas características en la cuenca, ayudará a que estas especies continúen ofreciendo beneficios ecológicos y económicos en la región.

Se identificaron en la cuenca, los sitios prioritarios para la conservación, de los cuales los de mayor importancia se localizaron en la parte baja de la

cuenca debido la localización del Parque Nacional Lagunas de Chacahua y a las 18 especies de peces y 12 especies de langostinos que representan importancia ecológica y económica por proteger.

Es prioridad reconocer estos sitios y conservarlos al momento de la planeación de alguna alteración en el río, tributarios o cuenca (extracciones, cambio de uso de suelo), que afecte o modifique los patrones naturales y conectividad en estos sitios.

Se reconoció también el nivel de alteración eco-hidrológica actual de la cuenca, lo que ayuda a focalizar acciones y esfuerzos encaminados a su conservación y restauración para un mejor manejo. Este tipo de acciones permitirán asegurar a largo plazo la gama de servicios ambientales que los ríos y la cuenca ofrecen a la región.

Aunque el nivel de presión hídrica en la cuenca es escaso, o sea, que aun existe disponibilidad en muchos sitios, es necesario tomar medidas adecuadas y oportunas que ayuden a evitar que esta presión aumente y exista una sobre-asignación del recurso agua. Una buena recomendación sería adoptar una visión integral del sistema socio ambiental para la toma de decisiones sustentadas en indicadores que reconozcan el nivel y tipo de desarrollo que puede sostener una región o territorio.

Finalmente, se ha identificado el objetivo de conservación deseado en distintas subcuencas del Río Verde, lo cual relaciona los requerimientos de

caudales ecológicos con el posible aprovechamiento de los recursos y beneficios que daría la cuenca, sobre todo para mantenerlos. Para ello es importante que se haga uso de las herramientas de planeación y conservación adecuadas, como la desarrollada con este trabajo.

9. Conclusiones y recomendaciones

Conforme a los objetivos y resultados obtenidos en esta tesis, se concluye que:

Los métodos hidrológicos son la base para la aplicación de métodos de caudal ambiental más avanzados ya que estos incorporan características físicas de la cuenca, incluidas en ese trabajo.

Las características hidráulicas del cauce y preferencia de hábitat por las especies requieren de estudios sitio o tramo específicos cuando se va a causar una alteración importante y se esperan ciertas respuestas de los ecosistemas acuáticos y rivereños a cambios en el régimen de caudal, ya sea en su magnitud, duración, temporalidad, frecuencia y tasa de cambio, por lo tanto, el seguimiento de estas respuestas puede integrarse a una estrategia adaptativa de caudal ambiental para armonizar el aprovechamiento con la conservación.

La región en la que se encuentra la cuenca del Río Verde, cuenta con un alto potencial de aprovechamiento hídrico, así que, la medición y análisis estadístico de los caudales, ha sido una herramienta de consulta con base científica, que ayudará a administrar y determinar la disponibilidad espacial y temporal para el desarrollo de proyectos de infraestructura hidráulica de aprovechamiento y generación de energía.

El software recomienda utilizar series de tiempo de 20 años mínimo por lo que sería adecuado para estudios posteriores más específicos o estudios en otras regiones, contar con mayor información, o bien analizar las limitaciones que implica utilizar un número menor de años. En este estudio, se utilizaron series de datos con periodos de registro de entre 15 y 45 años consecutivos, de esta manera se puede decir que los resultados obtenidos son confiables ya que solo 3 estaciones (Oaxaca Atoyac, Nduave y Yutama) tienen menos de 20 años aunque se recomendaría contar con mayor número de años de registro cuando estos existan.

Al realizar los análisis paramétricos basados en porcentajes, permitirá utilizar los datos para la asignación de caudales mínimos o adecuados como serán solicitados por estándares nacionales e internacionales. No obstante contar con análisis no paramétricos basados en las medianas y por lo tanto en la distribución de los datos asociados a su probabilidad, permite reconocer que aunque se considera un intervalo de variabilidad natural, se requiere reconocer los valores extremos que puede tomar cada parámetro hidrológico para identificar el tratamiento que se dé al sistema con las estrategias de caudal ecológico, ya sea que por las extracciones se le asigne un mínimo caudal (< percentil 10) y los valores de ubiquen como años secos o bien que por descargas de generación de energía pico se sobrepasen los percentiles altos (99) como si todos los días correspondieran a años muy abundantes.

Se considera que la herramienta IHA-RVA 7.1 es poderosa, ya que una vez arreglados los datos, ejecuta los análisis paramétrico y no paramétrico proporcionando las hojas de cálculo, así como una serie de gráficas para una interpretación más completa e incluso comparativa. Conforme con las versiones anteriores se ha ido mejorando y ofrece cada vez mayor número de análisis, como la de la permanencia de caudales o probabilidad de excedencia en su última versión. Además sus algoritmos están científicamente soportados en librerías internacionales de matemáticas y estadística (IMSL de Rogue Wave Software). Dichos algoritmos que los programadores han incluido en este Software, han sido la base de aplicaciones computacionales científicas por más de tres décadas y son un conjunto integral de funciones matemáticas y estadísticas (rutinas pre-escritas y probadas).

Las variaciones del régimen de caudal, que se han reconocido con la aplicación de la herramienta IHA-RVA 7.1 de TNC, mensuales, estacionales y para períodos de interés que comprenden 1,3,7, 30 y 90 días de máximos y mínimos caudales, se podrán asociar a procesos naturales de configuración del cauce, disponibilidad de hábitat y conectividad. Sin embargo, se requieren estudios específicos de sitios de importancia. De esta manera, los valores hidrológicos obtenidos adquieren significancia ambiental y puede darse seguimiento a la respuesta del ambiente a los cambios.

Para cuencas como la del Río Verde con presencia de ecosistemas acuáticos interconectados, con baja presión sobre el agua y bajo desarrollo hidráulico, pero con importantes proyectos de aprovechamiento para consumo y

generación de energía, resultará relevante contar con una estrategia de caudal ecológico que apoye el manejo de la cuenca armonizando la conservación de los ecosistemas y sus servicios ambientales, así como los beneficios sociales actuales y esperados.

Los datos disponibles sobre la conexión entre el Río Verde y las lagunas de Chacahua en la parte baja de la cuenca, permite reconocer que la estrategia de caudal ecológico planteada, requiera la reproducción de avenidas de distintos períodos de retorno (2 y 10 años, principalmente) y con esto mantener dicha conexión.

La integración de la información disponible sobre elementos hidrológicos, geográficos y ecológico-ambientales resulta en menores tiempos y costos para la posterior aplicación de otras metodologías, que requieran análisis más detallados para la protección del ecosistema y sus servicios ambientales, de esta manera, se espera que una vez reconocida la importancia del régimen natural de caudales en distintas partes de la cuenca, se promueva una mejor distribución para los distintos usos.

La integración de la información espacial, hidrológica y ambiental en un SIG, dio como resultado la fácil consulta y concentración de datos específicos para cada sitio analizado. Este SIG, sirve como un marco de análisis de las condiciones actuales y tiene la característica de ser escalable, ya que permite la actualización de la información, si se decide realizar trabajos posteriores.

Conforme con los objetivos de este trabajo, se logró caracterizar el régimen natural en cada uno de los sitios establecidos, conociendo así el comportamiento histórico de los ríos principales de la cuenca y los valores umbrales de esa variación, por lo tanto, se reconoce la importancia de mantener esta variabilidad y una adecuada asignación de caudales ecológicos, ya que están estrechamente relacionados con los procesos ambientales que ocurren en los ríos, esto que ayudará a la conservación de la estructura y función de los ecosistemas acuáticos.

Al mismo tiempo, al caracterizar ambientalmente la cuenca, se identificaron rasgos físicos en cada uno de los sitios y su relación los procesos ambientales de transporte y conectividad, por esta razón, se recomienda considerar los resultados de este trabajo para establecer caudales ecológicos, ya que permitirá mantener la funcionalidad y los servicios y beneficios que los ríos ofrecen a los seres vivos.

10. Referencias

- Arriaga, L., Aguilar, V., & Espinoza, J. M. (2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. *Capital natural de México. Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 433–455). México: Conabio.
- Avilés-Garay, E. J. (2003). Estadísticas: Contrastes paramétricos y no paramétricos. Puerto Rico.
- Barraza, J. E. (2010). *MANEJO INTEGRADO DE AGUA Y AGUAS COSTERAS (MIACC) ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS CONECTIVIDAD EN ECOSISTEMAS TERRESTRES Y MARINAS*.
- Bhaduri, B., Harbor, J. O. N., Engel, B., & Grove, M. (2008). Assessing Watershed-Scale , Long-Term Hydrologic Impacts of Land-Use Change Using a GIS-NPS Model. *Environmental Management*, 26(6), 643– 658.
- Brisbane. (2007). *Declaración de Brisbane*.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), & CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2010). *Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad*.
- CONAGUA. (2011a). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. (SEMARNAT, Ed.) (p. 185). México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2011b). *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*. (SEMARNAT, Ed.) (Primera Ed.). Mexico: SEMARNAT.
- ConserveOnline. (2011). The Indicators of Hydrologic Alteration. Retrieved from <http://conserveonline.org/workspaces/iha>
- Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. (1a. ed., p. 232). México: SEMARNAT, INE, Fundación Gonzalo Río Arronte.

DOF-19/06/2007. (n.d.). DOF - Acuerdo de Disponibilidad media anual de las aguas superficiales. 19/06/077.

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

ELOHA. (2010). *LÍMITES ECOLÓGICOS DE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS. Ecological Applications* (pp. 1–4).

Fitzhugh, T. W. (2005). GIS Tools for Freshwater Biodiversity Conservation Planning. *Transactions in GIS*, 9(2), 247– 263. Retrieved from http://science.natureconservancy.ca/centralinterior/docs/ERAtoolbox/7/tgis_215.pdf

García, R. E., González, R., Martínez, P., Athalía, J., & Paz-Soldán, G. (1999). *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México* (Colección ., p. 190). México: CNA-IMTA-SEMARNAP.

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

Gordon, N. D., McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (2004). *Stream Hydrology An Introduction for Ecologists Second Edition*. New York: John Wiley & Sons.

Gómez-Martínez, J. F. (2009). *Estudio Hidrológico e hidrometeorológico de la cuenca del Sistema Ambiental Regional del proyecto de aprovechamiento hidráulico Paso de la Reina, Oax .* (pp. 1–254). México.

Horwitz, R. J. (1978). Temporal variability patterns and the distributional patterns of stream fishes. *Ecological Monographs*, (48), 307–321.

Kabir, A., Mahdavi, M., Bahremand, A., & Noora, N. (2011). Application of a geographical information system (GIS) based hydrological model for flow prediction in Gorganrood river basin , Iran. *Journal of Agricultural Research*, 6(1), 35–45.

- Koleff, P., Soberón, J., Arita, Patricia, Dávila, Ó., Flores-villela, J., Halffter, G., & Lira-noriega, C. (2008). Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies. *Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. (pp. 323–364.). México: CONABIO.
- Koleff, Patricia, Tambutti, M., March, I. J., Esquivel, R., Cantú, C., & Lira-Noriega, A. (2009). Identificación de prioridades y análisis de vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad de México. *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 651–718). Mexico, D.F.: Conabio.
- LGVS Art. 60Ter. (2012). Ley general de vida silvestre, 1–60.
- Lowry, J. (2006). *Low-cost GIS software and data. Environment*.
- McMahon, T. A., & Mein, R. G. (1986). *River and Reservoir Yield*. Littleton CO.: Water Resources Publications.
- Mitsch, W., & Gosselink., J. (1993). *Wetlands, 2nd ed.* (p. 539 pp.). John Wiley & Sons, New York.
- PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011 Proyecto de Norma Mexicana. Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal ecológico en cuencas hidrológicas. 23 Feb. 2012 (2012).
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., et al. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170. Retrieved from <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>
- Postel, S., & Richter, B. (2003). *Rivers for life: managing water for people and nature*. Washington, DC.: Island Press.
- Quevedo-Urías, H. A. (2006). *Métodos estadísticos para la ingeniería ambiental y la ciencia* (p. 848). Chihuahua, México: Biblioteca Virtual de la Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Retrieved from <http://bivir.uacj.mx/LibrosElectronicosLibres/UACJ/ua00001.pdf>

- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., & Powell, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(4), 329–340.
- Richter, Brian D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37.
- Richter, Brian D., Warner, A. T., Meyer, J. L., & Lutz, K. I. M. (2006). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Research and Applications*, 22(3), 297–318. doi:10.1002/rra.892
- Rogue Wave Software. (2012). Rogue Wave. Retrieved from <http://www.roguewave.com/products/imsl-numerical-libraries.aspx>
- SEMARNAT. (2010). *Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (2010th ed., p. 105). Mexico, D.F.: SEMARNAT.
- Salinas-Rodríguez, S. A. (2009). *Caracterización y Diagnóstico en tramos de los ríos Prusia, El Plan, Cuxtepeques, Negrito y El Rosario en la reserva de la Biósfera “El Triunfo” (REBITRI) y su zona de influencia*. Universidad de Alcalá de Henares.
- Sanderson, J. S., Rowan, N., Wilding, T., Bledsoe, B. P., Miller, W. J., & Poff, N. L. (2011). GETTING TO SCALE WITH ENVIRONMENTAL FLOW ASSESSMENT : THE WATERSHED FLOW EVALUATION TOOL. *River Research and Applications*.
- Schueler, T. R. (1994). The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques*, 1(3), 100–111.
- TNC. (2011). Agua Dulce - Manteniendo el caudal ambiental en los ríos. 2011. Retrieved from <http://espanol.tnc.org/habitats/aguadulce/fluorios.html>
- TNC (The nature Conservancy). (2009). *Manual de usuario de Indicadores de alteración hidrológica, Versión 7.1. Nature*.
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4).

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. Retrieved from <http://doi.wiley.com/10.1002/rra.736>

Veza, P., Parasiewicz, P., Rosso, M., & Comoglio, C. (2011). DEFINING MINIMUM ENVIRONMENTAL FLOWS AT REGIONAL SCALE : APPLICATION OF MESOSCALE HABITAT MODELS AND CATCHMENTS CLASSIFICATION. *River Research and Applications*.

www.eflownet.org. (2012). Global Environmental Flows Network. Retrieved from <http://www.eflownet.org>

Correo electrónico: sergiorodriguez@outlook.com