

METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES EN RÍOS REGULADOS POR PRESAS



Rebeca González Villela

Alfonso G. Banderas Tarabay



METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES EN RÍOS REGULADOS POR PRESAS

REBECA GONZÁLEZ VILLELA Y ALFONSO G.
BANDERAS TARABAY

2015

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

www.imta.gob.mx

577.64072 González Villela, Rebeca
G64 *Metodologías para el cálculo de caudales ecológicos y ambientales en ríos regulados por presas /*
Rebeca González Villela y Alfonso G. Banderas Tarabay.. -- Jiutepec, Mor. :
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015.
262 p.
ISBN: 978 607 9368 37 1

1. Ríos 2. Presas 3. Ecología 4. Medición de caudales 5. México

Coordinación editorial:

Coordinación de Comunicación,
Participación e Información.
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización
y Servicios Editoriales.

Primera edición: 2015.

Ilustración de portada:
Oscar Alonso Barrón

Diseño y formación:
Luis Enrique Nájera Zamora

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
MÉXICO
www.imta.gob.mx

ISBN: 978 607 9368 37 1

Colección: "Avances del Conocimiento"

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	VII
AGRADECIMIENTOS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. CAUDALES ECOLÓGICOS	7
3. PRINCIPIOS BÁSICOS Y CONSECUENCIAS ECOLÓGICAS DE LA ALTERACIÓN DE LOS REGÍMENES DE CAUDALES EN LA BIODIVERSIDAD ACUÁTICA	15
3.1 INFLUENCIA DE LOS CAUDALES EN EL HÁBITAT	15
3.1.1 Influencia del caudal en el hábitat de las plantas acuáticas.	16
3.1.2. Influencia de los caudales y el hábitat en los invertebrados acuáticos.	16
3.1.3. Influencia de los caudales y el hábitat en los peces.	16
3.2 CONVERSIÓN DE CUERPOS DE AGUA LÓTICOS EN LÉNTICOS	17
3.3 RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES Y SU REPERCUSIÓN EN LAS ESTRATEGIAS DE VIDA DE LAS ESPECIES	17
3.3.1 Influencia del régimen natural de caudales en las historias de vida de los organismos	17
3.3.2. Influencia del régimen de caudal en la variación de la temperatura y su efecto en las historias de vida	18
3.3.3. Mantenimiento de los patrones de conectividad longitudinal y lateral esenciales para la viabilidad de las poblaciones de las especies ribereñas	18
3.4. FACILITACIÓN DE LA INVASIÓN DE ESPECIES EXÓTICAS E INTRODUCIDAS, Y SUSTITUCIÓN DE ESPECIES NATIVAS EN LOS RÍOS POR LA ALTERACIÓN DE LOS REGÍMENES DE CAUDALES	20
3.4.1. Conversión del hábitat lótico en léntico y facilitación de la invasión biológica	20
3.4.2. Transferencia de agua entre presas	20
4. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES AMBIENTALES	23
4.1. MÉTODO DE TENNANT O DE MONTANA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS	23
4.2. MÉTODO DE TENNANT ADAPTADO A LAS ZONAS TROPICALES Y SUBTROPICALES DE MÉXICO PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS	27
4.2.1. Caso de estudio: río Santiago, Nayarit	30
4.2.2. Resultados	30
4.2.3. Discusión	32
4.3 CAUDALES CALCULADOS CON EL MÉTODO DE LOS NÚMEROS DE ESCURRIMIENTO	33
4.3.1 Caso de estudio: Río Tepic, Nayarit.	35

4.3.2. Resultados	44
4.3.3. Discusión	46
4.4. HIDROPERIODO (INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION, IHA).	46
4.4.1. Caso de estudio: río Santiago, Nayarit	50
4.4.2. Metodología	50
4.4.3. Resultados	53
4.4.4. Discusión	83
4.5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL HÁBITAT	87
4.5.1. Recomendaciones para la restauración y conservación del hábitat	88
4.6. MÉTODO DE PREFERENCIA DE HÁBITAT (APROXIMACIÓN MULTIVARIADA)	89
4.6.1. Caso de estudio: río Santiago, Nayarit	90
4.6.2. Metodología	91
4.6.3. Resultados	92
4.6.4. Discusión	97
4.7. SIMULACIÓN DEL HÁBITAT (IFIM-PHABSIM)	101
4.7.1. Caso de estudio: río Santiago (Nayarit)	103
4.7.2. Métodos	103
4.7.3. Resultados	120
4.7.4. Discusión	123
4.8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS	128
4.8.1. Caso de estudio: Río Santiago, Nayarit	128
4.8.2. Resultados	128
4.8.3. Discusión	133
4.9. MÉTODOLOGÍAS HOLÍSTICAS	136
4.9.1. Metodología marco de respuesta río abajo ante la transformación impuesta en el caudal (DRIFT)	137
4.9.2. Componentes básicos de la metodología DRIFT	146
4.9.3. Caso de estudio: Río Verde, Oaxaca	147
5. DESAFÍOS PARA LOS CAUDALES AMBIENTALES Y LA SUSTENTABILIDAD DE LOS ECOSISTEMAS FLUVIALES	165
6. COMENTARIOS	171
7. REFERENCIAS	173
ANEXO 1. CÁLCULO DE CAUDALES POR EL MÉTODO DE LOS NÚMEROS DE ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO TEPÍC, NAYARIT	179
ANEXO 2. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL PARA CADA ZONA, DE ACUERDO A LA INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL RÍO TEPIC	193

ANEXO 3. REGISTROS HISTÓRICOS DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES (MM), EN LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA ZONA DE ESTUDIO DEL RÍO TEPIC	205
ANEXO 4. CAUDALES MENSUALES REGISTRADOS EN EL RÍO SANTIAGO, PARA EL PERIODO ANTERIOR (1955 - 1994) Y POSTERIOR (1995 - 2005) A LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA AGUAMILPA.	217
Anexo 5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL MEDIO MENSUAL	225
ANEXO 6. ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN LINEAL DE LOS CAUDALES BAJOS EN EL TIEMPO PARA LOS DIFERENTES MESES DEL AÑO	223
ANEXO 7. BATIMETRÍA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL TRAMO DE ESTUDIO DEL RÍO SANTIAGO	241
ANEXO 8. INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA E HIDROMÉTRICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL 1	245
Anexo 9. FOTOGRAFÍAS DE LAS ESPECIES ÍCTICAS DEL RÍO SANTIAGO, NAYARIT	253
ANEXO 10. FOTOGRAFÍAS DE LAS ESPECIES ÍCTICAS DEL RÍO VERDE, OAXACA	259

PRESENTACIÓN

La Dra. Rebeca González Villela es egresada de la Facultad de Ciencias (Biología) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ha trabajado en las áreas de investigación y docencia en las universidades Nacional Autónoma de México, Simón Bolívar y Autónoma del Estado de Morelos. Entre otras, ha impartido las cátedras de Biofísica; Física; Diseño de Experimentos; Productividad Primaria; Manejo, Conservación, y Recuperación de Cuerpos de Agua Superficiales; Manejo del Software Statistica y Manejo de la Sonda Multiparámetros Hidrolab4, a niveles licenciatura y posgrado. Cuenta con varias publicaciones en revistas de arbitraje nacional e internacional, capítulos en libros, dos videos sobre el manejo del agua en ríos y lagos, y dos libros Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México y Física aplicada a sistemas biológicos. Ha participado en numerosos congresos y es revisora de journals, ambas actividades, tanto en México como en el extranjero. En la actualidad trabaja en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

El Dr. Alfonso G. Banderas Tarabay obtuvo el doctorado en la Facultad de Ciencias (Biología) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y fue merecedor de la medalla Gabino Barreda en sus estudios de posgrado. Ha impartido diversas cátedras en la Facultad de Ciencias y en la Facultad de Ingeniería de las universidades Nacional Autónoma de México, Autónoma del Estado de México, Noreste y en la Universidad de San Carlos, en Guatemala, en las áreas de Biofísica, Fisicoquímica, Limnología, Diseño de Experimentos, Calidad del Agua, Técnicas de Restauración e Impacto Ambiental, en los niveles de licenciatura y posgrado. Es autor de varios artículos de arbitraje nacional e internacional, videos didácticos sobre el manejo de las cuencas hidrológicas y cuenta con varios capítulos en libros. Ha sido jefe de numerosos proyectos sobre el manejo del agua en ríos, lagos, presas, y lagunas costeras en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, que han dado lugar a numerosos trabajos en congresos nacionales e internacionales. Asimismo, ha fungido como revisor para journals en México y el extranjero.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Federal de Electricidad, por el patrocinio del estudio de la cuenca del Río Verde, Oaxaca; en particular a los biólogos Rosa Dina Yerandi y Octavio Sandoval, por su apoyo y seguimiento durante las campañas de muestreo realizadas en ese mismo río.

Al M. C. Eduardo Soto Galera, de la Escuela de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, por su participación en la recolecta, identificación y evaluación ictiológica en el tramo de estudio del río Santiago (Nayarit) y río Verde (Oaxaca).

Al equipo de investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jorge Brena, Marco Mijangos y Werner Wruck, por la información geográfica digital; a Juan F. Gómez, por el análisis hidrológico de la cuenca; a José Alfredo González y Joselina Espinosa, por el modelo hidrodinámico del Río Verde; a Miguel A. Mejía, por los análisis de aguas subterráneas del área de estudio; a Dolores Olvera y Marcia Yáñez, por los estudios sociales e información agropecuaria de la zona; a Javier Sánchez Chávez, Luis A. Inclán, por los muestreos de las variables fisicoquímicas y calidad del agua en el Río Verde, y a Jorge Izurieta y María Gómez, por la ayuda en algunos cálculos del caudal ecológico.

A Pedro Ramírez, del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por los estudios de vegetación de galería de bosque y de hidrofitas del Río Verde.

A Alejandro Ruiz, por toda la ayuda administrativa prestada en el desarrollo del proyecto correspondiente al cálculo del caudal ambiental en el Río Verde (Oaxaca).



Río Extóraz, Querétaro.

1

INTRODUCCIÓN

Acorde con el Inventario Nacional de Calidad del Agua de los Estados Unidos de América (EUA), los ríos se utilizan directamente para el suministro de agua potable, desalojo de los desechos incluidos en los drenajes y basura, irrigar cultivos, pesca y recreación.³² Se represan para controlar las inundaciones, almacenar agua y generar electricidad. Pero el cambio en el uso del suelo para la agricultura y la urbanización trae consigo la erosión y contaminación a través del vertido de drenajes urbanos, agrícolas e industriales, por lo que la sedimentación y el exceso de nutrientes son las causas más significativas de la degradación del hábitat para la vida silvestre en un 44% de los cuerpos de agua.^{14, 15, 16} En México, el panorama es similar, según diagnósticos realizados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2014).

Los cambios en el entorno del río tienen efectos acumulativos que se manifiestan en la degradación de la calidad del agua, en el decremento tanto del volumen de presas y lagos como de la capacidad de conducción del cauce; en la pérdida de hábitats para la vida silvestre y en el deterioro de su valor recreacional y estético. Impactos significativos todos que afectan al río, a los corredores fluviales y a los ecosistemas asociados^{8, 36, 38}. El “corredor fluvial” se refiere a sistemas y procesos ecológicos complejos que incluyen la variedad de suelos, de sistemas de corrientes,

de plantas y de animales que modulan el flujo del caudal; almacenan agua y remueven del agua nutrientes y materiales pesados, y que resultan en la adecuación del hábitat para un gran número de plantas y animales acuáticos y terrestres.^{5, 14, 16..}

El río y sus riberas responden conjuntamente a los cambios del entorno que afectan sus procesos físicos, químicos y biológicos. La respuesta resulta en la alteración del flujo de agua y sedimentos, en cambios de temperatura y de otras variables que actúan en sincronía para generar un “equilibrio dinámico”. Cuando los cambios rebasan los rangos naturales de variación, el balance dinámico puede perderse, dando lugar a un ajuste en el ecosistema que muchas veces no es favorable a las necesidades sociales.^{6, 9, 57}

La construcción de embalses y derivaciones para abastecer a las hidroeléctricas y termoeléctricas, a la agricultura y a las poblaciones, fragmentan longitudinalmente al río, alteran el régimen de flujo natural y modifican el transporte de sedimentos y el contenido de calor, materia orgánica y nutrientes, que provocan cambios físicos, químicos y biológicos tanto en la corriente como en las zonas de inundación.^{37, 57, 59, 61}

Actualmente, el ambiente es clave para el manejo sostenible del agua. Sin embargo, ocupa

un lugar marginal en la toma de decisiones no obstante sus repercusiones sociales. El entorno natural representa un tipo especial de usuario del agua y, a la vez, constituye la parte central del manejo de los recursos acuáticos. Este punto es crítico en el diseño de estrategias para enlazar y balancear los variados intereses que confluyen en torno al agua; por ejemplo, la producción agrícola, industrial y energética puede entrar en conflicto con la salud del ambiente y el bienestar y la pobreza de las comunidades aledañas al río. El objetivo de la gestión debe ser conciliar para lograr el manejo sostenible del recurso acuático y abatir la pobreza.^{14, 61, 92}

Los ríos pueden ser parcialmente restaurados aguas abajo de las presas a través de la operación de las hidroeléctricas. El control debe basarse en el análisis minucioso de las variables ambientales para reducir el riesgo corriente abajo y en las zonas de inundación.⁴⁹ Sin embargo, la complejidad del ecosistema dificulta la planeación por el costo y tiempo requeridos para determinar el caudal ambiental necesario a fin de mantener tanto a las especies como a la función y resiliencia del ecosistema, así como el bienestar de los pobladores que dependen del río.^{14, 15, 37}

La determinación del caudal ecológico y ambiental debe ser indispensable para quienes toman las decisiones en la planeación sustentable del agua, pues da la ventaja de saber cuánto del caudal remanente puede utilizarse para usos de la población, y cuánta alteración ha inducido el consumo humano en los patrones del flujo natural del río.^{14, 15, 32, 58, 70, 71, 73, 93}

Sin embargo, la interacción compleja de los procesos ecológicos dificulta el cálculo del volumen que debe suministrarse para la conservación del

ecosistema, uso urbano, irrigación, generación eléctrica, etc. Además de que, posteriormente, debe monitorearse sistemáticamente el efecto de las prácticas de conservación y restauración sobre el hábitat acuático y las riberas.^{50, 58, 64, 68, 95}

Es necesario el trabajo multidisciplinario para evaluar, diagnosticar y formular alternativas de manejo para la preservación e incremento de los recursos pesqueros, así como para la protección de la biodiversidad.^{16, 52, 61, 69, 71, 95} El manejo del río debe sustentarse en modelos que describan los aspectos temporales y espaciales del hábitat,⁸ así como en el uso de análisis hidrológicos que describan, evalúen y comparen el uso del recurso, y que determinen y establezcan los límites de suministro de agua. Por lo que debe enfatizarse la obtención de datos por varios años para entender el comportamiento de las corrientes y del hábitat acuático, y la variabilidad del suministro.^{9, 38}

El concepto “hábitat” es esencial en la vasta gama de metodologías de restauración y conservación de los ecosistemas fluviales. Se define como “el lugar donde viven las especies incluyendo los componentes físicos, químicos y biológicos adecuados para su existencia”; o como “el lugar donde una especie, población o comunidad encuentra las condiciones físicas, químicas y biológicas necesarias para sobrevivir, incluyendo la calidad del agua, las rutas de migración, los sitios de desove, descanso, alimentación y refugio contra los predadores o contra las condiciones adversas del medio”.^{12, 13, 27, 37, 62, 86}; o como “el espacio físico donde las características espacio-temporales del medio se encuentran en equilibrio dinámico con los factores estructurales del canal y el régimen hidrológico de manera favorable para el desarrollo de las especies”.^{9, 73, 74, 75, 76, 98}

La implementación del caudal ecológico o ambiental se ha filtrado al marco normativo de los recursos hídricos del país. El caudal ambiental adquirió importancia desde la aparición de la Ley de Aguas Nacionales, el 1o de diciembre de 1992, y su Reglamento, el 12 de enero de 1994 (CNA, 1994); así como la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en 1996 (Semarnap, 1997). Ambas legislaciones establecen la necesidad de conservar o considerar un caudal en los ríos para mantener su equilibrio ecológico.^{85, 86}

En 2007, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se llevó a cabo el Foro Nacional sobre la Determinación del Uso Ambiental del Agua o Caudal Ecológico, en cumplimiento de sus compromisos institucionales y cobijado bajo el tema “Ecohidrología”, del Programa Hidrológico Internacional (PHI), con el apoyo de la alianza World Wildlife Found (WWF)-Fundación Gonzalo Río Arronte. Participaron cuarenta instituciones y 110 ponentes nacionales e internacionales (ecólogos, hidrólogos, sociólogos, antropólogos, hidráulicos, juristas, economistas) de la sociedad y de los sectores gubernamental, académico e investigación.² Los objetivos fueron: 1) dar a conocer los métodos y experiencias desarrolladas en el mundo y en México, 2) identificar entre la comunidad académica y los expertos en el tema, criterios básicos y recomendaciones para la determinación e implementación del caudal ambiental en cuencas hidrográficas y acuíferos, 3) evaluar, aportar y homogeneizar la información aplicable al uso ambiental del agua con un enfoque integral, multidisciplinario e interdisciplinario, tomando en cuenta aspectos ecológicos, hidrológicos, jurídicos, sociales y económicos, y 4) discutir criterios para garantizar la conservación y restauración de los ecosistemas acuáticos del país.^{1, 2}

Así, se inició el interés por el tema que ha persistido hasta la fecha. Si bien entonces se concluyó que las experiencias en caudal ecológico y ambiental en México son limitadas, todavía escasea la publicación de estudios de caso. Persiste el interés en el sector ambiental y en la Conagua para generar, en combinación con la academia, los estudios conducentes a determinar los caudales e implementarlos para definir las metodologías, regulaciones y lineamientos que contribuyan a la conservación del hábitat en los ecosistemas fluviales.²

Con este propósito, se desarrolló la Norma Mexicana MX-AA-159-SCFI-2012, la cual “Establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas”, publicada en el Diario Oficial de la Federación, el 20 de septiembre de 2012.

La realización de la norma estuvo a cargo de la Comisión Nacional del Agua y el World Wildlife Fund, quienes contaron con la colaboración de: el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Comisión Federal de Electricidad, el Instituto Nacional de Ecología, el Instituto de Biología de la UNAM, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, The Nature Conservancy y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

La entrada en vigor de la norma y su aplicación es un logro para la gestión y conservación de los ecosistemas fluviales, lacustres, lagunares y estuarinos en México, debido a que promueve la preservación del caudal ecológico, con lo que se busca mantener el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico.

Sin embargo, a criterio de los autores, dicha norma se quedó corta y la metodología indicada resulta insuficiente para dar cabida a la complejidad del tema. En este libro se muestra una gama de metodologías, entre las que destacan aquellas que

dan más peso a los componentes naturales, otras a los sociales, otras a los económicos, y otras a sus combinaciones, por lo que el lector interesado podrá distinguir, entre todas, aquella o aquellas que mejor se ajustan a la realidad que enfrenta.



Río Moctezuma, Querétaro.

2

CAUDALES ECOLÓGICOS

El manejo de los recursos asociados con el agua bajo el esquema de desarrollo sostenible del ambiente, es un problema complejo para todas las naciones ricas o pobres, pues implica un reto técnico para enfrentar dificultades de origen social, económico y político.^{8, 14, 71}

Para el Banco Mundial, el manejo del agua incluye las fuentes superficiales y subsuperficiales destinadas a los usos urbano, agrícola, energético, industrial y extracción intensiva; así como su protección a través del control de la contaminación y de malezas, el manejo de residuos y la restauración de ecosistemas degradados (lagos, humedales, ríos). La protección de los recursos acuáticos es un factor esencial en el desarrollo sustentable de los diferentes usuarios y en el beneficio y desarrollo del sector social y económico.^{14, 15, 16, 28, 32}

En todo el mundo, los ríos se modifican con la construcción de presas para el control de avenidas; de extracciones para el suministro hidroeléctrico, agrícola y urbano, y para mantener el caudal adecuado para la navegación y el drenaje. Tal intervención genera impactos significativos que generalmente reducen el caudal total de los ríos, afectando su estacionalidad, magnitud y periodicidad.^{14, 37, 38, 39, 44, 83, 84, 90, 91} En muchos casos, afectan adversamente a los servicios hidrológicos y a la funcionalidad del

ecosistema, lo que incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones (especialmente de la gente pobre) que dependen directamente de sus servicios. Actualmente, se reconoce que las modificaciones tienen que balancearse entre los servicios ecológicos dependientes y el abastecimiento esencial de agua. Los caudales necesarios para mantener los servicios son llamados “caudales ambientales”.^{1, 2, 6, 13, 14, 71, 92, 95}

Algunos autores definen los caudales ambientales como el agua que se deja correr en un ecosistema fluvial, o el caudal que se libera dentro de él, con el propósito específico de manejar la condición del ecosistema. La falla en el manejo de los caudales ha conducido al deterioro en la estructura y función (salud) de muchos ríos en el mundo.^{15, 18, 31, 63, 75, 94}

Gaviño (2007) considera que la cuantificación del caudal ecológico busca un valor umbral por encima del cual una especie indicadora se recupera de las perturbaciones ocasionadas por la falta de escorrentía. Es decir, que los cambios originados en la especie dejan de ser irreversibles, y más bien dependen de la duración de los mismos y de la resiliencia ecológica de la especie. Por otro lado, define al caudal ecológico con un valor diferente al del caudal ambiental, ya que este último fija un umbral mínimo y/o máximo destinado a la satisfacción de las

necesidades establecidas de manera ad-hoc por la sociedad.⁴²

En la literatura actual se encuentran sinónimos de caudales ambientales, tales como: “caudales de compensación”, “caudales de mantenimiento”, “caudales mínimos” y “caudales de reserva” que generan una alta indefinición, sobre todo cuando se trata de aplicarlos a trabajos multidisciplinarios. García de Jalón y González del Tánago (2006) sugieren el término “caudal ecológico” por tener connotaciones claras, tanto para el público en general como para los técnicos, políticos y gestores del agua.¹

En la legislación española de 2007 se define a los caudales ecológicos como aquellos que mantienen sosteniblemente la función y estructura del ecosistema acuático y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado (potencial ecológico) en el río y en las aguas de transición. El objetivo del manejo es la recuperación o conservación de determinados aspectos del régimen natural de caudales, encargados de mantener adecuadas las condiciones del hábitat y de generar los procesos ecológicos, hidrológicos y geomorfológicos necesarios para conservar a largo plazo las comunidades biológicas en un estado previamente definido por un panel de expertos en conjunto con la sociedad y los políticos.^{8, 13, 14, 18, 76}

En la declaración de Brisbane, Australia (2007), durante el 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference, se acordó que el caudal ambiental provee el flujo que sostiene a los ecosistemas de agua dulce y costeros en coexistencia con la agricultura, la industria y las ciudades. Tiene el objetivo de restaurar y mantener la integridad del ecosistema, los bienes y servicios que presta, así como

la resiliencia de los mismos, puntos que deben evaluarse socialmente con la participación de equipos bien informados y científicamente sustentados.

Los científicos reconocen que no es adecuado establecer un caudal mínimo único, puesto que la estructura y función de un ecosistema ribereño y muchas adaptaciones de la biota son generados por los patrones de variación temporal en los caudales fluviales (el paradigma de régimen de caudales naturales).^{1, 5, 14, 18, 41, 49, 68, 69, 73, 74}

Los ecólogos interesados en la biodiversidad fluvial reconocen que para mantener las condiciones esenciales de salud y servicios que proveen los ríos, se requiere imitar la variabilidad natural de los caudales, tomando en consideración la magnitud, frecuencia, periodicidad, duración y tasa de cambio de los eventos de flujo en los ríos.^{8, 28, 57, 74, 75, 76, 77, 92, 95}

Los efectos ecológicos de la alteración hidrológica de los ríos con sus implicaciones socioeconómicas a escala global, como el aislamiento genético por la fragmentación del hábitat, el decremento de la biodiversidad y el abatimiento de las pesquerías y los servicios ecológicos, están documentados con abundantes discusiones detalladas e irrefutables.^{56, 57, 58, 66, 68, 75, 91, 99}

El informe de la Comisión Mundial de Presas identifica como prioridades la conservación de los ríos y los medios de subsistencia, así como reconocer derechos y compartir beneficios. Esto quiere decir que una presa puede y debe proveer el caudal ambiental y, por lo tanto, debe diseñarse, modificarse y operarse consecuentemente. Si el tema de los caudales ambientales se deja para más tarde, a menudo los problemas se agravarán

y las soluciones conllevarán costos económicos y sociales más elevados^{8, 14, 15, 16, 32, 57}

Con el impacto creciente sobre la biota de la ribera por la proliferación de las presas y la regulación del caudal, se han generado más de doscientos métodos para calcular el caudal ambiental con bases científicas, mismos que pueden agruparse en cuatro categorías: reglas de tipo hidrológico, métodos hidráulicos, métodos de simulación del hábitat y metodologías holísticas^{8, 14, 17, 32, 91, 92, 95}

Las aproximaciones holísticas para calcular el caudal ambiental en presas (v. gr. la Building Block Methodology (BBM) y la Downstream Response to Imposed Flow Transformation (DRIFT), van en aumento rápidamente en el hemisferio sur (Australia y Sudáfrica). En cambio, las metodologías de Hábitat se han concentrado en el hemisferio norte y en países desarrollados (USA y Europa).^{14, 15, 16, 32, 91, 92, 95}

Los estudios realizados en Sudáfrica, orientados hacia las metodologías holísticas, señalan que:

- a) los ríos perenes, los estuarios, el agua para mantener ríos efímeros, los humedales y el agua subterránea deben recibir la misma atención,
- b) la cantidad y la calidad del agua (aspectos esenciales del ambiente acuático) deben recibir igual atención al aplicar la metodología,
- c) el desarrollo de abastecimientos de agua (presas o extracciones) y la consecuente degradación potencial de los sistemas acuáticos relacionados, pueden analizarse para restaurar los caudales como parte de la rehabilitación del río.^{7, 8, 15, 21, 40, 53, 76, 91, 95}

El objetivo consiste en generar un mejor régimen de gestión que logre el equilibrio óptimo entre los diferentes usos y, en consecuencia, garantice la longevidad del ecosistema. Dado el uso excesivo de recursos hídricos en todo el mundo y el deterioro consiguiente de los ecosistemas y de sus servicios, los caudales ambientales no son un lujo, sino una parte esencial de la gestión hídrica moderna. Es una orientación que merece que se aplique ampliamente^{1, 14, 15, 16, 32, 56, 57, 58, 71}

Sin embargo, se necesitan vías legales y administrativas claras para proteger el flujo de agua antes de que las partes interesadas estén dispuestas a comprometerse y de que las agencias financien proyectos de caudal ambiental. No habrá intentos serios de gestión de caudal ambiental hasta que no se tomen decisiones políticas claras en la esfera apropiada de gobierno^{14, 15, 16, 18, 32, 56, 57, 58, 92}

Determinar un caudal ambiental requiere la integración de disciplinas como la ingeniería, el derecho, la ecología, la economía, la hidrología, la comunicación y las ciencias políticas. También exige negociaciones entre las partes para salvar los obstáculos que generen los intereses que compiten por el empleo del agua, en especial en las cuencas donde la competencia ya es grande^{8, 14, 31, 70, 91, 94}

Para lograr el impulso necesario y determinar caudales ambientales, se debe involucrar a muchos actores diferentes, desde el nivel gubernamental más elevado, hasta la comunidad y negocios locales. Una estrategia exitosa implicaría trabajar con la mayor cantidad posible de actores y de grupos interesados y adaptar tácticas a lo largo de las negociaciones, aunque a los actores les tome algún tiempo entender que el caudal ambiental es necesario tanto para las personas como para la naturaleza.^{14, 15, 16, 32, 58, 77, 92}

Los humedales, estuarios y ecosistemas marinos próximos a la costa brindan una gran variedad de beneficios a las personas. Estos incluyen “bienes” como agua potable, peces, fibra y “servicios” como purificación de agua, mitigación de inundaciones y oportunidades recreativas. Los ríos “sanos” y los ecosistemas conexos también tienen un valor intrínseco para las personas, valor que se puede expresar en función del significado cultural, en particular en el caso de las culturas indígenas.^{14, 31, 71, 92, 95}

Es importante distinguir entre la cantidad del agua que se necesita para sustentar un ecosistema en un estado cercano al prístino, y la que podría eventualmente asignarse al mismo luego de un proceso de evaluación ambiental, social y económico. Este último recibe el nombre de “caudal ambiental” y será un caudal que sustentará al ecosistema en un estado menos que prístino. Se podría pensar que se necesitaría todo el caudal natural, en su pauta natural de caudales altos y bajos, para mantener un ecosistema casi prístino.^{5, 6, 8, 14, 15, 16, 32, 70, 71, 95}

En el otro extremo, la ausencia prolongada de caudales pone en riesgo la existencia misma de los ecosistemas dependientes y, por lo tanto, las vidas, los medios de subsistencia y la seguridad de las comunidades e industrias río abajo.³²

La finalidad del caudal ambiental consiste en establecer un régimen de flujo adecuado en cantidad, calidad y regularidad para sustentar la integridad del río y otros ecosistemas acuáticos. Esto no significa que las ventajas ecológicas sean necesariamente el único resultado, o inclusive primario, de un programa de caudal ambiental.^{5, 8, 9, 12} Este programa deberá lograr un equilibrio entre asignaciones de agua para satisfacer las necesidades ecológicas y las otras

necesidades de utilización de la misma, como la hidroeléctrica, la irrigación, el agua potable o la recreación. Desarrollar un programa de caudal ambiental, por tanto, significa reconocer los valores centrales sobre los que basarán las decisiones, determinando qué resultados se buscan y definiendo qué trueques conllevarán.^{32, 49, 56, 63, 76, 77}

Para establecer un caudal ambiental, se necesita identificar objetivos claros en cuanto al uso de la corriente y establecer escenarios para la extracción y utilización. Del mismo modo que establecer caudales ambientales es una cuestión de valores, así también fijar objetivos fluviales es en gran parte un proceso sociopolítico. Por consiguiente, un proceso exitoso debe incluir representantes de diferentes grupos de interés, así como científicos y expertos. Todos los que participen deben poseer una comprensión básica de lo que implica establecer y gestionar caudales ambientales.^{14, 31, 56, 71, 77}

En sentido físico, significa examinar el ecosistema desde sus fuentes hasta los entornos costero y estuarino, incluyendo sus humedales, llanuras de inundación y aguas subterráneas conexas. En cuanto a ética, significa tomar en cuenta valores ambientales, económicos, sociales y culturales con relación al sistema total. Debe considerarse una amplia gama de resultados para su inclusión en un programa de caudal ambiental, desde la protección de la naturaleza hasta la satisfacción de las necesidades de las industrias y las personas.^{8, 14, 18, 58}

En un sistema donde se ha asignado agua en exceso para consumo humano, podría establecerse un caudal ambiental para conseguir que los ecosistemas funcionen lo suficientemente bien para proporcionar una base sostenible de

recursos naturales para las necesidades presentes y futuras de consumo. En caso de que se haya comprometido en demasía y gravemente un sistema, y los valores no permiten una suficiente reasignación de recursos para restaurarlo todo, se pueden escoger ciertos tramos de río o sitios de humedales para protegerlos con asignaciones específicas.^{15, 16, 32, 56, 57, 71, 77}

No se puede subestimar el precio por no proporcionar caudales ambientales. Resulta cada vez más claro que, a mediano y largo plazos, no satisfacer las necesidades del caudal ambiental puede tener consecuencias desastrosas para muchos usuarios del río.

Todos perdemos si no gestionamos caudales ambientales adecuados. No son la única característica de un sistema fluvial íntegro. Hay otros requisitos para satisfacer las necesidades estructurales y funcionales de los ríos, como disminuir la contaminación y controlar actividades como la pesca y la recreación.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 88}

A medida que se monitoreen y evalúen las respuestas al caudal ambiental de plantas, animales, recursos y personas, quizá haya que modificarlo. Este proceso se conoce como gestión adaptable y forma parte esencial de los trueques que conlleva la definición y gestión del caudal ambiental. La mayoría de los ecosistemas fluviales se gestionan en mayor o menor grado, y se acepta que la extracción de agua para abastecimiento público, irrigación y procesos industriales es necesaria para la supervivencia y desarrollo humanos.^{14, 32, 92, 95}

No existe un método universal para evaluar el caudal ambiental. Cada método, enfoque o marco resultará adecuado solo para un

conjunto de circunstancias particulares. Entre los criterios para escoger un método, enfoque o marco específico está la clase de problema (extracción, presa, plan de derrame fluvial, etc.), competencia, tiempo y dinero disponibles, así como el marco legislativo dentro del cual establecer los caudales.^{5, 7, 56, 71, 92}

No obstante la existencia de más de doscientos métodos para la determinación de los caudales ambientales, hasta ahora ninguno ha sido aplicado a escala regional para el manejo de los recursos acuáticos. Sin embargo, numerosos autores señalan que las metodologías holísticas son más apropiadas que las de simulación del hábitat, particularmente para los países en desarrollo, debido a la necesidad de enfocarse a la protección de los recursos dentro de un marco ecosistémico, y de la fuerte dependencia para la subsistencia y generación de bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas acuáticos; así como por la capacidad inherente de las metodologías holísticas para incorporar técnicas avanzadas de la hidráulica, herramientas para la modelación del hábitat, otros modelos predictivos y múltiples componentes del ecosistema que proporcionan mayor información.^{1, 14, 31, 92, 95}

En general, los enfoques integrales utilizan equipos de expertos e incorporan la participación de las partes involucradas, incluyendo los aspectos científicos. Los métodos integrales tienen la ventaja de abarcar la totalidad del sistema hidrológico-ecológico-partes interesadas. La desventaja es el alto costo de la recopilación de datos relevantes, aunque sale más caro no determinarlos y analizarlos científicamente. La evaluación del caudal ambiental es un tema especializado y, por ello, debe por necesidad involucrar a expertos. Rara vez se dispone de datos suficientes como

para que alguien que no es experto aplique de manera plena un método objetivo integrado en una situación específica. El enfoque de equipo reconoce que la evaluación del caudal ambiental es un asunto multidisciplinario, que requiere insumos de una amplia gama de áreas especializadas.^{5, 8, 14, 15, 16, 56, 71, 76, 92, 95}

La aplicación de cualquier metodología de caudal ambiental requiere del establecimiento de un programa nacional y regional de recopilación de datos que debe incluir mediciones de hidrología (caudales fluviales), hidráulicas (nivel de agua y sección transversal de ríos) y ecología (especies presentes, ubicación y relaciones con el caudal) en una amplia gama de sitios, de tal manera que se abarquen en forma representativa los diferentes biotopos y su situación nacional y regional.^{5, 8, 9, 14, 38, 56, 57, 58}

La planificación a escala regional involucra la evaluación de caudales ambientales en toda la cuenca fluvial. Dicha evaluación puede comenzar con el empleo de cuadros de consulta para identificar sitios críticos. Luego, lo más apropiado sería realizar un inventario de las características climatológicas y fisiográficas de la región. Luego, una investigación más detallada bajo el título probable de “evaluación

de impacto” que podría incluir estudios de tipos de hábitat. En muchos casos, la evaluación implica el impacto y su mitigación, dadas las modificaciones específicas del cauce, tales como presas o extracciones importantes.³²

En sentido estricto, restaurar es “restablecer la estructura y función de un ecosistema” a su estado más o menos natural. En la práctica, no resulta posible una restauración completa por la presencia de presas, cuando las extracciones son importantes, o por los desarrollos en las llanuras de inundación. En consecuencia, la restauración se utiliza en el sentido de devolverle al río o tramo de río un estado preindustrial reciente.^{14, 32, 56, 77}

Todas las mejoras a los métodos van acompañadas de una mayor complejidad. Se espera que los nuevos modelos conduzcan a nuevas normas generales para mejores métodos de investigación y ayuden a definir los impactos por la regulación del caudal fluvial. El concepto de que todos los elementos del ecosistema recibirán apoyo si el régimen de caudal es el natural es, implícitamente, integral. En la actualidad, estos métodos adoptan un enfoque integral que incluye de manera explícita todo el ecosistema, tales como humedales conexos, aguas subterráneas y estuarios.^{7, 10, 32, 56, 71, 92, 95}



Río Moctezuma, Querétaro

3

PRINCIPIOS BÁSICOS Y CONSECUENCIAS ECOLÓGICAS DE LA ALTERACIÓN DE LOS RÉGIMENES DE CAUDALES EN LA BIODIVERSIDAD ACUÁTICA

La alteración del régimen de caudal constituye una amenaza continua a la sustentabilidad ecológica de los ríos, zonas de inundación y humedales asociados. Está documentado ampliamente que afecta de cuatro maneras principales a la biodiversidad acuática en las corrientes, según Ward y Tockner (2001) y Arthington *et al.* (2006):

- Las estrategias de vida de las especies evolucionan en respuesta directa a la variación natural del régimen de caudales, por lo que su alteración puede conducir a la pérdida de biodiversidad de especies nativas.
- Los patrones naturales de conectividad longitudinal y lateral de las riberas es esencial para la viabilidad de las poblaciones de muchas especies, por lo que es primordial su conservación.
- La modificación del régimen de caudales facilita la introducción e invasión de especies exóticas en los ríos.
- El caudal es el determinante principal de las condiciones del hábitat físico en los

ríos y, en consecuencia, es el factor más influyente en su composición biótica. La influencia del caudal sobre los hábitats es diferente si se analiza en el ámbito de cuenca (dimensiones del cauce), o en un segmento (condiciones hidráulicas sobre un tramo), ya que la dimensión del hábitat modifica la apreciación de la distribución y abundancia de los organismos.

3.1. INFLUENCIA DE LOS CAUDALES EN EL HÁBITAT

La ecología del río está definida por la interacción entre la fisiografía y el escurrimiento en el área de la cuenca. Ambos influyen a escala espacial y temporal en el régimen de caudales, la geología local y la topografía, mismos que a su vez determinan el hábitat acuático dando forma y tamaño al canal, estabilizando el substrato y distribuyendo las pozas y rápidos, factores que condicionan la distribución, abundancia y diversidad de los organismos en ríos y corrientes.

Aun a pequeña escala, las variaciones en los caudales pueden generar una distribución y abundancia particular de plantas y animales en el suelo del río.^{12, 18, 25, 29, 30, 49, 63, 65, 69, 73, 88}

3.1.1 INFLUENCIA DEL CAUDAL EN EL HÁBITAT DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS

La precipitación, el régimen de caudales, la hidráulica y la composición del substrato determinan las sequías, inundaciones, variación local en la velocidad de la corriente, turbulencia, fuerza de rompimiento, estabilidad del substrato, deslaves; todos ellos factores abióticos que definen la variación espacial y temporal en la composición y estructura de las asociaciones de hidrofitas acuáticas. Por su parte, la comunidad vegetal ribereña presenta una distribución en parches como resultado de la variación espacial del medio y de sus estrategias de reproducción, dispersión, colonización y tasas de crecimiento de las especies.^{10, 12, 18, 41, 52, 63, 66, 73, 91}

3.1.2 INFLUENCIA DE LOS CAUDALES Y EL HÁBITAT EN LOS INVERTEBRADOS ACUÁTICOS

La dinámica espacial y temporal de las comunidades bénticas en los ríos es determinada principalmente por las variaciones en la frecuencia, magnitud, periodicidad, duración y tasa de recambio de los caudales durante las sequías. Los ríos con substratos inestables tienden a presentar una baja diversidad de especies, y la biota presenta generalmente historias de vida características de ambientes frecuentemente perturbados (organismos colonizadores).^{63, 64, 69}

Los caudales con patrones erráticos se caracterizan por la presencia de comunidades con pocas especies de macroinvertebrados, pues son vulnerables al cambio rápido de caudal diurno y a los caudales regulados río abajo de las hidroeléctricas.^{5, 6, 7, 8, 32} La disminución repentina en el caudal puede causar sequía catastrófica y eliminar hasta un 14% de la biomasa bentónica. En cambio, la liberación de caudales muy altos puede afectar a las ninfas de insectos y otros invertebrados que no toleran corriente fuerte y desaparecen de tales tramos. La regulación del caudal presenta el riesgo de favorecer la proliferación de taxa específicos que se convierten en plaga y amenaza para la salud de los pobladores del entorno.^{75, 76, 77, 93, 97, 98, 99}

3.1.3 INFLUENCIA DE LOS CAUDALES Y EL HÁBITAT EN LOS PECES

La variabilidad espacial de los caudales afecta al hábitat y éste a los peces. Muchas especies de peces muestran preferencia por un tipo particular de hábitat (pozas, remolinos, áreas someras), por lo que la riqueza de la fauna generalmente se incrementa paralelamente a la complejidad del hábitat (diferencias en profundidad, velocidad de la corriente, tipo de sedimento, cubierta vegetal). Por su parte, la estructura de la ictiofauna (composición taxonómica y abundancia relativa de las especies) está también relacionada con la complejidad del hábitat.^{38, 40, 41, 62, 83, 84}

Numerosos trabajos han ilustrado la relación entre las diferencias regionales en la estructura de la ictiofauna y la organización funcional de los ríos. Donde las variaciones hidrológicas son altas, las especies muestran estrategias

de alimentación generalista y preferencia por aguas de baja velocidad, arena y substrato generalizado. En corrientes con caudales base más estables y caudales diarios más predecibles, la comunidad de peces está constituida por especies especialistas intolerantes a los sedimentos.^{84, 99, 101, 102}

El efecto de la variabilidad de caudales y hábitat puede detectarse a escala menor dentro de la red de drenado. Los tributarios que presentan caudal bajo por largo tiempo son dominados por pequeñas especies fisiológicamente tolerantes y generalistas.^{60, 79, 103}

Dada la fuerte interrelación entre estructura del hábitat-caudal-peces, no sorprende que las modificaciones en el régimen del caudal regulado por presas afecten a la diversidad y organización funcional de las comunidades ícticas.^{5, 6, 7, 32} Las presas han modificado el régimen de temperatura, de tal manera que alteran la adecuación de las especies nativas en sus tasas de reproducción, crecimiento y sobrevivencia.^{10, 32, 37, 69} La susceptibilidad de una especie a quedar atrapada depende de su comportamiento frente a los cambios estacionales en el caudal total y su tasa de variación diaria, temperatura del agua y tipo de substrato. El impacto puede involucrar cualquier historia de vida en todas las escalas espaciales. Por ejemplo, las corrientes pueden atrapar a los peces en barreras de grava y en canales fuera del río durante los decrementos rápidos de caudal.^{82, 83}

3.2. CONVERSIÓN DE CUERPOS DE AGUA LÓTICOS EN LÉNTICOS

Se argumenta frecuentemente que existe una pérdida de hábitats ribereños al construir una

presa, debido a que un hábitat lótico (río) se transforma en léntico (lago) en el cuerpo del embalse. A diferencia de los ríos, en los lagos y humedales el flujo del carbono y los nutrientes ocurren en buena medida en la zona litoral. El nivel de agua de las grandes presas presenta fluctuaciones fuertes, por lo que las áreas de productividad litoral no son estables.^{32, 74, 76, 95} Se encuentran por arriba de su nivel natural durante la fase de almacenamiento, cuando la interface terrestre-acuática se eleva significativamente con la zona de inundación, creando una zona litoral y un hábitat léntico nuevos, con bancos profundos, diferentes condiciones fisicoquímicas y menor complejidad del hábitat. Así, las especies exóticas introducidas encuentran ventajas competitivas, generalmente proliferan y provocan la extinción de las especies nativas.^{8, 10, 66, 96, 98}

3.3. RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES Y SU REPERCUSIÓN EN LAS ESTRATEGIAS DE VIDA DE LAS ESPECIES

3.3.1 INFLUENCIA DEL RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES EN LAS HISTORIAS DE VIDA DE LOS ORGANISMOS

Es bien conocido que el régimen de caudales en los humedales afecta la agrupación y crecimiento de la vegetación acuática. Las fluctuaciones del nivel de agua y su intensidad (velocidad y estrés de rompimiento en la velocidad de la corriente) y la frecuencia de los torrentes e inundaciones (perturbación) afectan la sobrevivencia de las semillas y la tasa de crecimiento de las plantas. La proliferación de especies hidrófilas se basa en sus historias de vida, (producción de semillas

pequeñas y numerosas, con alta capacidad de dispersión por el viento a grandes distancias —anemócoras—, alta capacidad para germinar estando sumergidas, rápidas tasas de crecimiento, y reproducción vegetativa). El cambio de régimen afecta acentuadamente al establecimiento y supervivencia de muchas especies no tolerantes, con poca capacidad para regenerarse en condiciones modificadas.^{8, 53, 64, 68, 69, 99}

Las historias de vida de los peces en los regímenes de caudales naturales se encuentran ligadas a eventos críticos. La fenología de la reproducción (patrones de crecimiento y agregación, fecundación, desove, sobrevivencia larval) está sincronizada con la duración del día y la temperatura del agua, por lo que un régimen de caudal artificial o impuesto no entra en armonía natural con los ciclos estacionales y puede tener un impacto negativo en la biota acuática. El periodo entre picos del caudal natural con la lluvia puede servir también como guía o gatillo para desovar en ciertas especies de peces. Muchas especies de microorganismos, del fito y zoo bentos, del fito y zoo plancton, son guiadas por el caudal alto, emergiendo del estado de reposo al de ovoposición en respuesta a la señal de incremento en el nivel del agua o a las inundaciones.^{10, 31, 37, 60, 62, 676}

3.3.2 INFLUENCIA DEL RÉGIMEN DE CAUDAL EN LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y SU EFECTO EN LAS HISTORIAS DE VIDA

Además de la hidrología prevaiente, que determina la periodicidad de los caudales y los eventos de inundación, también son importantes los regímenes de temperatura

en las historias de vida de muchos animales acuáticos y ribereños. En regiones bajo un régimen de flujo predecible, las evidencias señalan hacia una alta sincronía en el desarrollo de las especies. Por ejemplo, los florecimientos de vegetación acuática son una respuesta a los eventos de cambio de caudales episódicos e impredecibles.^{14, 15, 16, 31, 32, 55}

Sin embargo, en los ríos regulados por presas, la modificación del régimen de caudales va acompañada por grandes modificaciones en el régimen térmico. Así, la liberación río abajo de agua del hipolimnion del embalse, que se caracteriza por ser fría y deficiente en oxígeno, puede influir en el comportamiento de desove de los peces y en otros procesos de las historias de vida de los invertebrados, porque los insectos acuáticos y los peces utilizan señales combinadas de la longitud del día y edad de los individuos para llegar a la fase adulta. Durante largos periodos de liberación de agua hipolimnética, se puede causar la desaparición selectiva de especies susceptibles en el primer tramo río abajo de la presa. La modificación de los patrones térmicos y las señales del fotoperiodo (o longitud del día) también reducen la sucesión o progresión poblacional.^{7, 9, 44, 60}

3.3.3 MANTENIMIENTO DE LOS PATRONES DE CONECTIVIDAD LONGITUDINAL Y LATERAL ESENCIALES PARA LA VIABILIDAD DE LAS POBLACIONES DE LAS ESPECIES RIBEREÑAS

3.3.3.1. Conectividad longitudinal

La viabilidad de las poblaciones de la mayoría de las especies acuáticas depende de su

libertad para moverse a través de la red de canales en los ríos. Las especies grandes de macroinvertebrados migratorios, como langostinos y cangrejos, son importantes en los trópicos y subtropicos ya que influyen directamente sobre procesos del ecosistema tales como la producción primaria, el procesamiento de materia orgánica, la composición de la comunidad ficobentónica y la de los invertebrados y la sedimentación. La construcción de presas y la extracción de agua pueden tener un impacto mayor sobre la migración de las especies del género *Procambarus*.^{17, 21, 57, 68, 69, 79, 81}

Por su parte, los peces diadromos, que migran grandes distancias entre el mar y el canal principal de los ríos y sus tributarios, son sensibles a las barreras longitudinales que obstruyen sus rutas migratorias y pueden interferir particularmente con sus ciclos de vida. Por ello, es que las barreras en los ríos han contribuido a la declinación de las especies de peces migratorios.^{17, 25, 31}

3.3.3.2. Conectividad lateral

La conectividad hidrológica entre los canales del río, la zona de inundación y las aguas subterráneas (acuíferos), así como la heterogeneidad espacial y temporal, producen una biodiversidad mayor en la zona ribereña que en el terreno circundante. La expansión lateral de la zona de inundación, o llenado, genera hábitats importantes para el desove, crianza y alimentación de una variedad de peces e invertebrados. La extensión y duración de la inundación durante las lluvias pueden determinar la duración del acceso a los sitios

para la crianza y la alimentación de los peces. También pueden quedar atrapados en una zona aislada de la llanura de inundación al retraerse el agua del sistema ribereño.

Por otro lado, en la estación seca, la mortalidad de los peces atrapados en sus refugios puede ser muy alta debido al deterioro de las condiciones fisicoquímicas, a la reducción en la disponibilidad de alimento y a la falta de refugio contra los predadores. De aquí, que la duración y la frecuencia de la conexión durante los caudales altos, el aislamiento periódico de los diques formados al retirarse la inundación y la proximidad de tales sitios al canal principal son importantes en la determinación de la composición de la comunidad de peces.^{8, 10, 14, 15, 16, 40, 60, 74, 81, 84, 97}

La regulación de un caudal represado frecuentemente reduce la conectividad hidrológica y altera las trayectorias de sucesión de la biota en la llanura de aluvión, al reducir la frecuencia, extensión y duración de la inundación. Los caudales bajos también reducen la diversificación de hábitats en la zona anegada y, al dejar de ser formadores del canal, modifican los patrones de la migración. Estos cambios terminan reduciendo la diversidad biológica y la integridad ecológica de las zonas de inundación.^{14, 15, 16, 71, 72, 79, 95}

Los caudales bajos reducen la conectividad entre los canales del río y los flujos dentro de la zona de inundación, lo que favorece la alineación de los bancos y la retención del agua atrapada entre los mismos por periodos de más de 12 meses, lo que conduce a la muerte de los especímenes atrapados.^{8, 10, 13, 14, 55, 56, 94}

3.4. FACILITACIÓN DE LA INVASIÓN DE ESPECIES EXÓTICAS E INTRODUCIDAS, Y SUSTITUCIÓN DE ESPECIES NATIVAS EN LOS RÍOS POR LA ALTERACIÓN DE LOS RÉGIMENES DE CAUDALES

El régimen de caudales naturales tiene una influencia profunda en la biodiversidad de los ríos, arroyos y zonas de inundación o humedales. Además del caudal, existen varios mecanismos causales operando en forma interrelacionada a diferentes escalas temporales y espaciales. En consecuencia, es difícil determinar cuáles atributos de la alteración de los caudales es directamente responsable de los impactos observados. Sin embargo, se reconoce que ciertos aspectos del régimen de caudales son importantes para un proceso ecológico particular.^{73, 74, 76, 93}

Las especies introducidas no son propias del lugar, pero se ven favorecidas por los cambios en el ambiente debido al impacto ecológico asociado a la modificación del régimen

de caudales, incluyendo la pérdida de los ciclos generados por la alternancia de las temporadas de lluvias y estiaje en las llanuras de inundación.^{53, 54, 55}

3.4.1 CONVERSIÓN DEL HÁBITAT LÓTICO EN LÉNTICO Y FACILITACIÓN DE LA INVASIÓN BIOLÓGICA

La invasión de especies introducidas es mucho más probable en sistemas acuáticos alterados permanentemente por la actividad humana, a través de la generación de embalses permanentes y la creación de regímenes de caudales más constantes al derivar y represar los ríos. Esto favorece a muchas especies propias de los lagos respecto a las de los ríos.^{10, 64, 75}

3.4.2 TRANSFERENCIA DE AGUA ENTRE PRESAS

Arthington *et al.* (2006) señalan que La transferencia de agua entre embalses presenta serios problemas en el balance y calidad del agua y perturbaciones significativas en los procesos ecológicos, lo que puede alterar la distribución natural de la biota acuática y acelerar la propagación de plagas y enfermedades.



Río Extóraz, Querétaro.

4

METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES

4.1. MÉTODO DE TENNANT O DE MONTANA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

El método de Montana fue desarrollado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los EUA (US Fish and Wild Life Service, USFWLS). Para validar el método se utilizaron estudios de campo de 11 ríos de tres estados de la Unión Americana de 1964 a 1974; así como los análisis físicos, químicos, biológicos y pesquerías (en aguas frías y calientes) de 38 diferentes ríos en 58 secciones transversales ubicadas a lo largo de 315 kilómetros de corriente. Los resultados indican que las condiciones del hábitat acuático son semejantes en la mayoría de los ríos en los que circula una porción similar del caudal fluvial medio.^{42, 91}

Otro estudio efectuado por el mismo USFWLS en diez ríos y 48 cauces diferentes, señaló tres parámetros físicos: ancho del cauce, profundidad y velocidad de la corriente a nivel de la superficie libre del agua, como las variables determinantes en el buen estado del hábitat y desarrollo de los organismos acuáticos. Los tres parámetros se incrementan al aumentar el caudal, sobre todo cuando los caudales son bajos. Los tres registraron cambios notables en el intervalo que va de cero a 10% del caudal medio anual (Figura 4.1.1). Es notorio que el 10% del caudal medio cubre el 60% del substrato húmedo, y que la profundidad media de 30.5 cm y la velocidad media de la corriente de 24 cm s⁻¹, son considerados como puntos críticos que determinan el límite inferior para el desarrollo de los organismos acuáticos, particularmente de los peces.^{45, 73, 91}

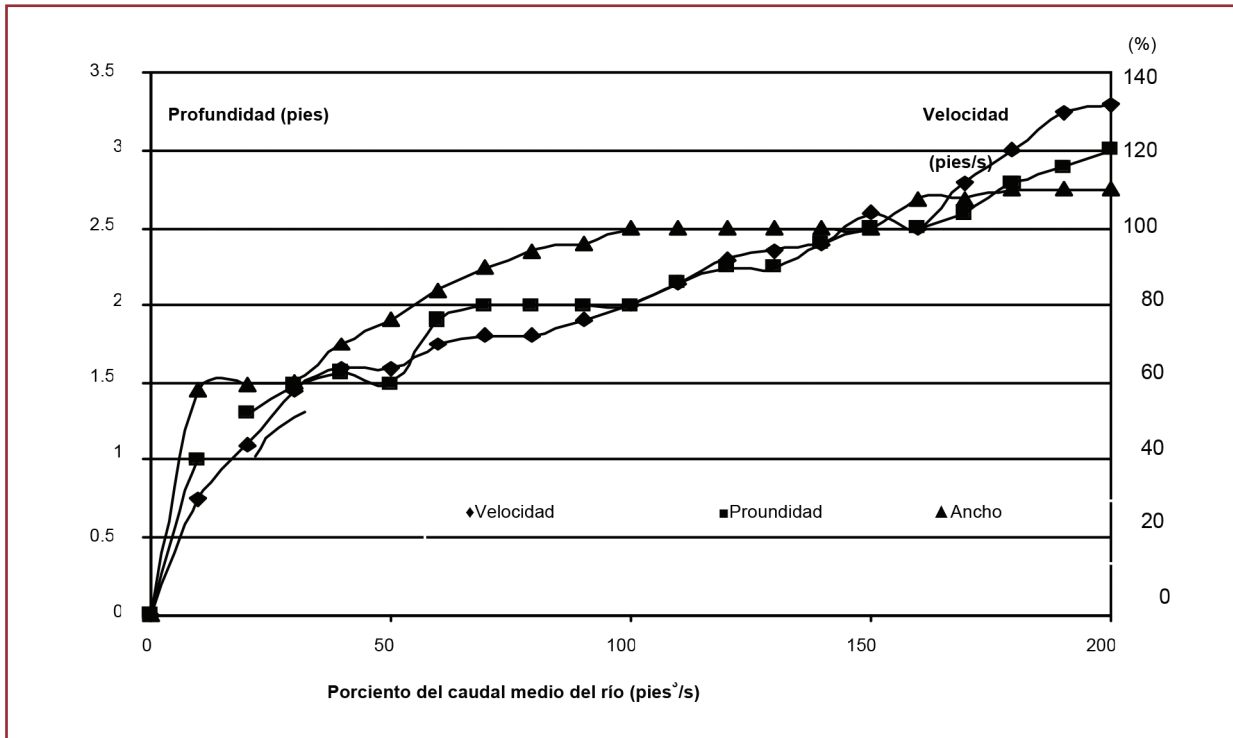


Figura 4.1.1. Caudales naturales y caudal ecológico para el río Santiago, por el método de Tennant modificado para las zonas tropicales y subtropicales de México (modificada de García et al., 1999).

Estas observaciones permiten concluir que el caudal mínimo necesario para garantizar su sobrevivencia es el 10% del caudal medio anual (CMA).

La presencia de caudales comprendidos entre el 30 y el 100% del CMA incrementa al 40% el sustrato cubierto por agua, la profundidad media aumenta de 46 hasta 61 cm (33%) y la velocidad media de la corriente se incrementa de 46 a 61 cm s⁻¹ (33%). Este intervalo de caudales ecológicos ofrece los criterios cualitativos bueno y óptimo para el desarrollo de los organismos acuáticos. Sin embargo, este suministro requiere de tres a diez veces la cantidad de agua necesaria para el caudal mínimo y aún no permite la navegación. Por último, si se aumenta el caudal fluvial de 100 a 200% del CMA, el sustrato húmedo aumenta tan solo el 10%, la profundidad media varía de 61 a 91 cm (49%) y la velocidad media aumenta de 0.61 a 1.07 m s⁻¹ (75%). Esta última puede remover sedimento

y materiales del lecho y permitir la navegación, condición considerada muy adecuada para el desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos.^{42, 73, 91}

El análisis de los aforos realizados por la United State Geological Survey (USGS) en el periodo 1958-1975, ofreció correlaciones similares entre velocidad, profundidad y ancho del cauce para una amplia variedad de ríos de 21 estados de los EUA. Incluyó datos de arroyos con mucha pendiente ubicados en lo alto de las montañas Rocallosas (Rocky Mountains), ríos de gran longitud y poco gradiente de las praderas centrales, así como corrientes de las planicies costeras. De aquí, Tennant (1976) generó la siguiente descripción cualitativa de flujos:

a) El 10 % del CMA es el mínimo recomendable a corto plazo para mantener el hábitat a nivel de sobrevivencia para la mayoría de las formas de vida en el cauce. Pero se reducen significativamente el ancho a nivel de la superficie del agua, la profundidad y la velocidad del flujo, y se degrada el hábitat acuático. La mitad del substrato, o posible perímetro mojado del río, queda expuesto a la intemperie y la exposición es mayor, excepto en las áreas anchas, en los rápidos de poca profundidad y en las barras. Los canales laterales y las barras muestran desecación severa o total, y las islas dejan de funcionar como hábitat para nidos, guaridas, criaderos y refugios de la fauna silvestre. La cobertura vegetal de la ribera disminuye notablemente por la falta de agua y pierde su utilidad como hábitat para peces y madriguera para mamíferos. La disminución de la profundidad en amplias áreas del cauce induce la migración de peces hacia las pozas profundas y dificulta su paso sobre los rápidos tan bajos. En los tramos someros, con frecuencia la temperatura del agua es un factor limitante que reduce de manera considerable la presencia de invertebrados, especialmente durante los meses cálidos. Esto induce la concentración de peces en las pozas y en los rápidos más profundos a favor de la pesca, pero aumenta el riesgo de sobreexplotación. Se dificulta la flotación aun en canoas o balsas de caucho, y se degradan la belleza natural y la estética del río.^{42, 91}

b) El 30% del CMA permite adecuar el hábitat para la sobrevivencia de las formas de vida acuática. El ancho de la superficie

libre del agua, la profundidad y la velocidad son satisfactorios. El agua cubre la mayor parte del substrato, excepto en las zonas muy anchas, en los rápidos de poca profundidad o en las barras. La mayoría de los cauces laterales llevan un poco de agua y las barras de grava están parcialmente hundidas. Muchas islas son hábitat para nidos, guaridas, criaderos y refugios de vida silvestre. Las riberas con cobertura vegetal proveen hábitats y guaridas para peces y animales silvestres. Muchos rápidos y pozas son suficientemente profundos para ser habitados por los peces. A la vegetación ribereña no le falta agua y genera un paisaje agradable. Los peces grandes pasan por los rápidos. La temperatura del agua no es limitante para el desarrollo de la vida acuática en la mayor parte del río. Los invertebrados se reducen pero no son un factor limitante de la producción pesquera. La cantidad y la calidad del agua favorecen la pesca, la flotación y el recreo, especialmente con canoas, balsas de caucho y embarcaciones pequeñas de poco calado. En general, la estética del río y la belleza del paisaje son satisfactorias.^{42, 91}

c) El 60% del CMA es adecuado para generar un hábitat de excelente a excepcional para la mayoría de las formas de vida acuática durante el periodo de crecimiento inicial, así como para diversos usos recreativos. El ancho del río, profundidad y velocidad de la corriente favorecen al hábitat. La mayor parte del substrato está cubierto con agua, incluyendo rápidos y áreas de poca profundidad, como los cauces laterales. Algunas barras de grava están

expuestas y la mayoría de las islas son aptas para que la fauna silvestre anide, críe, se guarezca o refugie. La vegetación ribereña tiene suficiente agua y provee zonas seguras para los peces y cobertura para madrigueras de la fauna silvestre. Las pozas y rápidos están cubiertos con agua suficiente para brindar un excelente hábitat para la crianza y alimentación de peces y no representan problema para su

migración. Las temperaturas del agua no son un factor limitante para la vida en ningún tramo del río. Los invertebrados son variados y abundantes. La calidad y cantidad de agua son excelentes para la pesca y la navegación en canoas, balsas y barcas mayores, así como para la recreación en general. La estética y la belleza natural del río son de excelentes a excepcionales (Tabla 4.1.1).^{42, 91}

Tabla 4.1.1. Clasificación de caudales por el método de Tennant.

Caudal medio anual (%)	Sustrato Humedecido (%)	Velocidad Media (cm ⁻¹)	Profundidad Media (cm)	Criterio
10	60	24	30.5	Mínimo
30-100	40	46-61	46-61	Bueno y óptimo
100-200	10	61-107	61-91	Excelente

Tennant (1976) afirma que los estudios realizados por el USFWLS y la participación de grupos interdisciplinarios experimentados, respaldan la validez de este método. García *et al.* (1999) señalan que el surgimiento, desarrollo y aplicación del método de Montana en los EUA hizo necesaria la adaptación de esta metodología a los ríos de México (zonas

tropicales y subtropicales) para determinar los requerimientos de cantidad y calidad del agua necesaria para los ecosistemas locales, basados en estudios de caso sobre el comportamiento de la biota acuática de diferentes regiones y cauces mexicanos, y considerando la variación climática estacional para estas zonas (estiaje y lluvias), como se indica a continuación.^{42, 91}



Río Moctezuma, Querétaro.

4.2. MÉTODO DE TENNANT ADAPTADO A LAS ZONAS TROPICALES Y SUBTROPICALES DE MÉXICO, PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

En comparación a otros, el método de Tennant es rápido y fácil de implementar. Para aplicarlo en México se introdujo una adaptación en los periodos considerados para el cálculo de los caudales. De octubre-marzo (época de estiaje) y abril-septiembre (periodo de lluvias) en las zonas templadas de USA; a noviembre-mayo (estiaje) y junio-octubre (lluvias) en las zonas tropicales y subtropicales del país, periodos que varían ligeramente dependiendo de la región considerada. Además, los cálculos se basan en los caudales medios mensuales (CMM), en lugar de los promedios anuales (CAM), con el fin de tener una descripción más detallada durante el año. Sin embargo, para determinar los caudales ecológicos se necesitan los registros de los caudales medios mensuales y anuales de, por lo menos, diez años antes de la construcción de la presa elegida.⁴²

La época de estío corresponde a los meses que presentan valores de caudal promedio mensual menores al promedio anual, y la época de lluvia es aquella donde el caudal sea mayor al promedio anual. Hay que calcular el caudal promedio para el mes de lluvias pico (siete días), pues es el que da forma y limpia el cauce. Estas modificaciones tienen el fin de incluir la influencia del clima estacional en el cauce y en la conservación de la vida silvestre y los recursos asociados, y posteriormente, determinar el caudal sobrante para uso agrícola, urbano, turístico, etcétera.

La Tabla 4.2.1 muestra los resultados del método de Tennant modificado y aplicado a un río mexicano. A la izquierda se muestran los valores extremos del caudal natural, registrados en la estación hidrométrica más cercana, y los promedios mensuales; mientras que al lado derecho se muestran los caudales ecológicos recomendados por el método con base en el caudal medio anual (en negritas) de los años registrados.

Nótese que durante el estío y durante lluvias, ocasionalmente se presentan caudales naturales diarios menores y mayores, respectivamente, a los caudales mínimo recomendado y excepcional recomendado, lo que destaca la gran variabilidad de los caudales naturales, hecho que debe normar el criterio del administrador de la presa. Hay que resaltar que el 10% del CAM, que corresponde al criterio mínimo (o pobre) necesario del método de Tennant, se recomienda sólo por periodos cortos en el estiaje (unos 15 días). Además, se recomienda:

- 1) Aplicar un porcentaje mayor al anterior ($Q_{RE} = 20\%$ del CAM), debido a que las condiciones ambientales en estiaje estresan a la mayor parte de la biota que transita por el río, y así reducir el impacto sobre los organismos adaptados a migrar, reproducirse, desovar o criar cuando ocurren cambios estacionales.
- 2) Aplicar el 30% durante las lluvias para tratar de compensar las variaciones estacionales intercalando Pulsos de Caudal Alto (PCA = 60% del CAM) en el periodo de lluvias (4 a 6, según convenga), y dos o tres Pequeñas Inundaciones (PI = 200% del CAM), tratando de imitar los patrones de variación anual de los caudales observados para la localidad en estudio.

Tabla 4.2.1. Método de Tennant modificado para México y aplicado al cálculo de los caudales ecológicos en el río Santiago (modificada de García et al., 1999).

	Entidad Federativa	Cuenca	Corriente:	Estación:				
	Nayarit	Río Santiago	Río Santiago	Despeñadero				
Mes	Caudal diario	Caudal diario	Caudal mensual	Caudal de reserva ecológico (Q_{RE})**				
	Máximo	Mínimo	Medio	Mínimo				
	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)	10%	10%-30%	20%-40%	30%-50%	40%-60%
Enero	205.40	27.29	52.95	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Febrero	161.50	7.46	41.02	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Marzo	137.50	6.97	35.62	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Abril	1223.50	5.28	48.96	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Mayo	105.10	5.18	36.62	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Junio	1281.80	5.75	117.42	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Julio	1291.40	56.18	465.80	18.56	55.67	74.23	92.79	111.34
Agosto	1699.20	67.50	508.33	18.56	55.67	74.23	92.79	111.34
Septiembre	1385.80	46.17	478.99	18.56	55.67	74.23	92.79	111.34
Octubre	1266.20	46.28	238.36	18.56	55.67	74.23	92.79	111.34
Noviembre	1485.90	27.56	118.44	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Diciembre	866.10	22.07	72.62	18.56	18.56	37.12	55.67	74.23
Media anual			185.58					

García *et al.* (1999) afirman que es indispensable conocer las características fisiográficas y bióticas del río, y estimar las necesidades hídricas del ecosistema para calcular y ajustar los caudales mínimos óptimos que garanticen su integridad ecológica. Su concepción se basa en la observación de las características del hábitat fluvial, respecto a los caudales circulantes.⁴¹

La determinación del caudal ecológico se efectúa en un segmento del río que coincida con la ubicación del aprovechamiento hidráulico (presa, derivación, bombeo, etcétera), o con el lugar en el que se pretenda modificar el régimen de caudales. El caudal calculado corresponde al tramo delimitado por este punto y la próxima extracción o aportación a la corriente que modifique significativamente el caudal.^{40, 41}

Para el cálculo de los caudales ecológicos, se requiere identificar la estación hidrométrica más cercana al punto que se va a evaluar (siempre aguas arriba de la presa o reguladora en cuestión para obtener el régimen de caudales naturales) y obtener los registros hidrométricos de, por lo menos, diez años de antigüedad.⁴¹ En México, generalmente, es necesaria la consulta de:

- Los boletines hidrológicos (SARH), con la información de las estaciones de aforo.
- El Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas), de la Comisión Nacional del Agua.
- El disco compacto denominado CD-HIDRO, con información hidrométrica del periodo 1937-1985 (CNA).
- La información hidrométrica de las oficinas regionales (gerencias) de la CNA.
- La información de las estaciones hidrométricas operadas por la entidad federativa involucrada y por la Comisión

Federal de Electricidad, así como las aportaciones al embalse operado por esta dependencia.

- Los mapas de la topografía e hidrología superficial de la zona de interés (INEGI).
- La información climatológica del Sistema de Información Climatológica del Servicio Meteorológico Nacional (SICSMN).⁴²

Como el método requiere del conocimiento de los caudales históricos en el punto de interés, así como del cálculo de sus promedios anuales y mensuales, García *et al.* (1999) sugieren la siguiente estrategia:

1. Consultar el plano topográfico o mapas SIG (Sistema de Información Geográfica) de la zona donde se ubiquen las estaciones hidrométricas y pluviométricas, los lugares de extracción y aportación a la corriente fluvial; las cartas del INEGI y los mapas actualizados de la Comisión Nacional del Agua.
2. Identificar la estación hidrométrica más cercana al punto de interés donde se va a determinar el caudal ecológico. El tramo del cauce debe estar situado donde exista información histórica de los caudales originales anteriores a la construcción de la obra (presa, extracciones mediante tuberías u otro tipo).
3. Obtener, al menos, diez años de registros de los caudales históricos originales que circulan o circulaban por el punto de interés con anterioridad a la construcción de la obra hidráulica.
4. En caso de no existir una estación hidrométrica aguas arriba del punto, deben

deducirse las aportaciones mediante el Registro del Régimen de Almacenamiento de la presa. Si los aportes a la presa ya están regulados por obras anteriores, se debe obtener información de la estación hidrométrica con los datos anteriores a la construcción de la obra más antigua para poder integrar o calcular el caudal que circulaba en el tramo de estudio.

5. Cuantificar los caudales medios mensuales de diez años o más.
6. Definir los periodos de estiaje y lluvia. Los meses cuyo caudal medio sea inferior al caudal medio anual se consideran meses de estiaje, y los que sean superiores serán meses de avenidas.
7. Calculados el caudal medio anual y mensual, y determinados los periodos de estío y lluvia, se definen los caudales ecológicos con base en la clasificación del método de Tennant resumido en la Tabla 2: caudales extremos bajos (10% del promedio anual) para periodos cortos de la época de secas (15 días); caudales mínimos óptimos para los periodos de regulación (20%); caudales bajos (30%) en lluvias; pulsos de caudal altos (60%) para la época de lluvias, y pequeñas inundaciones (200%) en lluvias por periodos cortos durante la estación húmeda (siete días).
8. Si no se cuenta con registros hidrométricos, es necesario estimar la lluvia efectiva a partir del Método de Los Números de Escurrimiento, que calcula los caudales naturales a partir de la precipitación y de algunas características fisiográficas de la cuenca vertiente.⁴²

4.2.1 CASO DE ESTUDIO: RÍO SANTIAGO, NAYARIT

El Sistema Lerma-Santiago se ubica en la vertiente del Pacífico de la red hidrográfica del país. El río Santiago inicia en el lago de Chapala, Jalisco, pasa por el estado de Nayarit y desemboca en el océano Pacífico, en Boca de Asadero. Su caudal medio anual de 1982 a 1992 fue de $185.58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 1994). El caudal mínimo fue de $6.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 1984, y el máximo de $4\,604 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 1988, en este periodo. El tramo de estudio se localiza a $21^\circ 45' \text{ N}$ y $104^\circ 55' \text{ O}$. Sus características hidráulicas corresponden a zonas de rápidos, pozas y pendientes uniformes con corrientes rápidas, lentas y de transición, con profundidad variable, por lo que es representativo de la mayor parte de los hábitats acuáticos. La vegetación ribereña presenta de buena a regular conservación (Figura 4.2.1).

El río ofrece recursos pesqueros para la subsistencia de la población rural local y algo para la comercialización, así como para la pesca recreativa en el embalse. Sin embargo, el hábitat de las especies nativas del río ha sido afectado por la construcción y operación hidroeléctrica de la presa Aguamilpa y la reguladora San Rafael, por la invasión de especies exóticas, por las actividades agropecuarias y la construcción de caminos, que contribuyen a fragmentar el río, a modificar los caudales y el transporte de sedimentos, y a degradar la calidad del agua.^{32, 38, 45, 46, 47, 48, 54}

4.2.2 RESULTADOS

Con los registros hidrológicos recopilados del río Santiago durante diez años, se calcularon los caudales naturales y los caudales recomendados mínimo indispensable y mínimo óptimo, tomando en consideración el 10 y el 20% del CAM, que se muestran en la Tabla 4.2.2 y Figura 4.2.2.

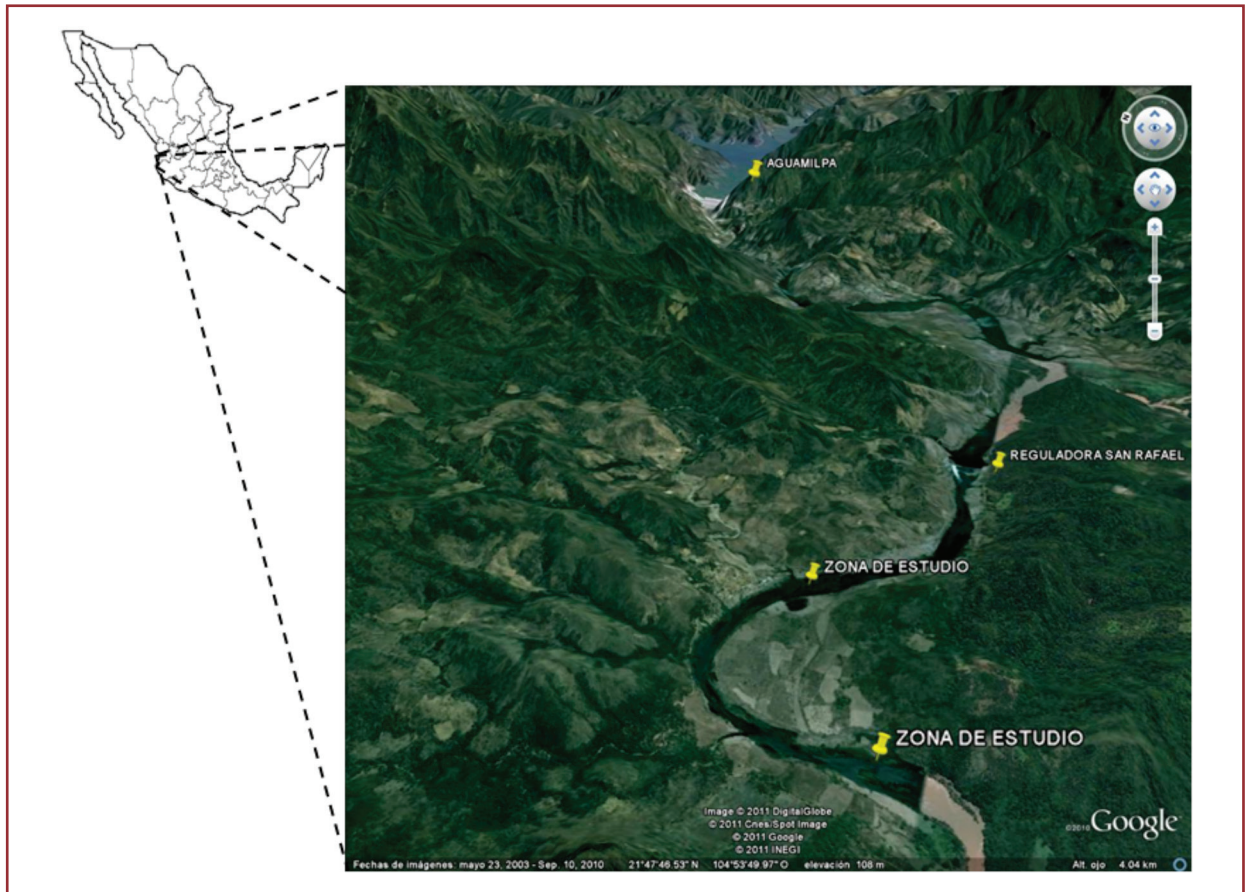


Figura 4.2.1. Localización del río Santiago y la zona de estudio.

Tabla 4.2.2. Caudales calculados para el río Santiago por el método de Tennant (modificada de García *et al.*, 1999).

Mes	Caudal natural (m ³ s ⁻¹)	Caudal ecológico (m ³ s ⁻¹)	(%) del Caudal Anual Medio	Días recomendados (Núm.)
Enero	152.95	37.12	20	31
Febrero	41.02	37.12	20	28
Marzo	35.62	37.12	20	31
Abril	48.96	18.56	10	15
Mayo	36.62	37.12	20	31
Junio	117.42	37.12	20	30
Julio	465.80	55.67	30	31
Agosto	508.33	55.67	30	31
Septiembre	478.99	370	200	7-15
Octubre	238.36	55.67	30	31
Noviembre	118.44	37.12	20	30
Diciembre	72.62	37.12	20	31
*Caudal Año Medio: 185.58 m ³ /s				

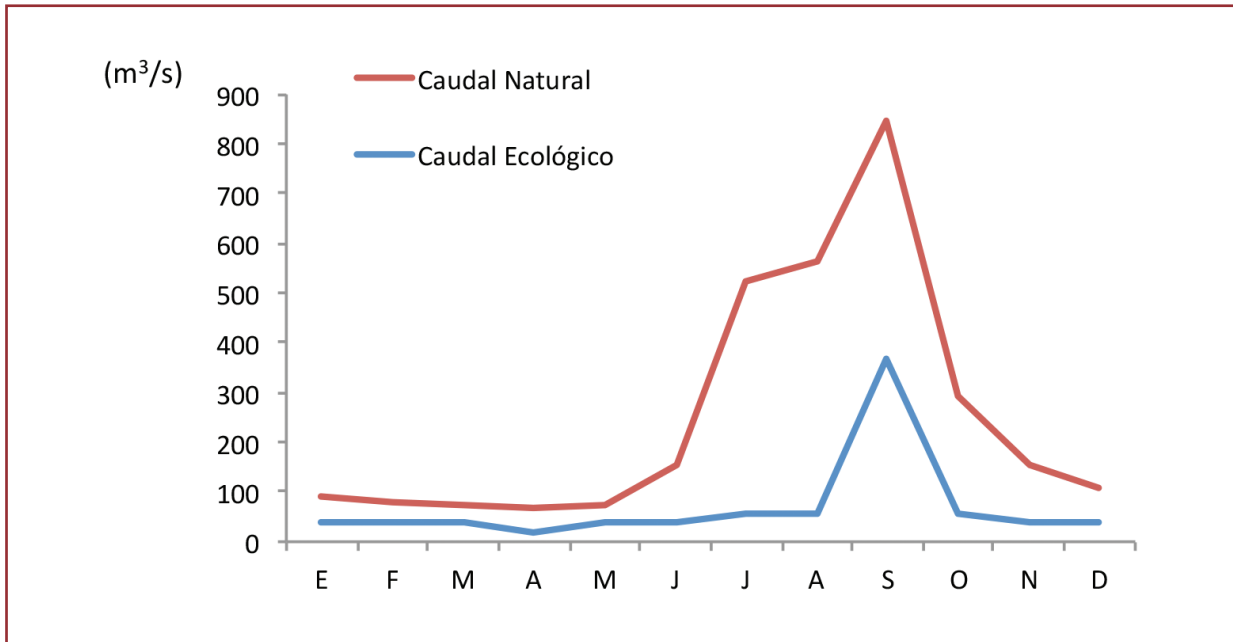


Figura 4.2.2. Caudales naturales y caudal ecológico para el río Santiago por el método de Tennant modificado, para las zonas tropicales y subtropicales de México (modificada de García *et al.*, 1999).

Durante el estío, el caudal del 10% ($18.56 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) se aplicaría por periodos cortos (15 días), igual que el caudal del 200% ($371.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) durante el pico de lluvias, para simular las pequeñas inundaciones (7-15 días) y con el fin de no afectar el balance de agua dulce y marina en el delta del río.

4.2.3 DISCUSIÓN

Se recomienda el siguiente régimen de caudales ecológicos, basado en el criterio de los autores:

1. Criterio cualitativo “bueno” para la época de estiaje y “aceptable” bajo para la época de avenidas, con un mínimo del 20% del CAM ($37.12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).
2. Caudal extremo bajo en la época de estío, con 10% del CAM ($18.56 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) por periodos cortos (15 días).
3. Criterio “aceptable” alto para la época de avenidas, con 30% del CAM ($55.67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).
4. Pulsos de caudal alto para el pico de lluvias, con 200% del CAM ($371.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), durante siete días.

Este criterio busca restablecer las condiciones ambientales para que el caudal anual del río, aguas abajo de las presas, sea recomendable para:

- mantener el hábitat adecuado para la sobrevivencia de la mayoría de las formas de vida acuática;
- que el ancho de la superficie libre del agua, profundidad y velocidad sean, en general, satisfactorias;
- que la mayor parte del substrato esté cubierto con agua;

- que la mayoría de los cauces laterales lleven un poco de agua;
- que las barras de grava estén parcialmente cubiertas con agua y muchas islas sean hábitat para nidos, guaridas, criaderos y refugios de la vida silvestre.

La vegetación ribereña no padecerá estrés hídrico y generará un paisaje agradable. Las riberas con cobertura vegetal sana proveerán hábitats para peces y guaridas para la fauna silvestre. Muchos rápidos y pozas serán suficientemente profundos para ser frecuentados por los peces, y los individuos grandes podrán pasar por los rápidos. La temperatura del agua no resultará limitante para el desarrollo de la vida acuática en la mayoría de los segmentos del río. La vida de los invertebrados se reducirá, pero no se convertirá en un factor limitante en la producción pesquera. Las variaciones en los caudales generarán las señales necesarias para la migración, desove y reproducción de los organismos acuáticos. La cantidad y calidad del agua serán buenas para la pesca, la navegación y el recreo; especialmente con canoas, balsas de caucho y embarcaciones pequeñas de poco calado. En términos generales, la estética del río y la belleza natural serán satisfactorias.

Es necesario hacer notar que, en general, el río Santiago no padece de algún déficit de agua, ni siquiera en la porción más cercana a la presa de Aguamilpa. Al estar situado en una zona climáticamente favorable, la lluvia prácticamente no escasea en ninguna época del año. Por el contrario, es necesario mantener un desfogue continuo en la cortina para turbinar y evitar que ésta se vea rebasada en la época de avenidas máximas. La selección de este río obedeció simplemente a la coincidencia entre la entrada en operación de la cortina y la aparición del tema de caudales ecológicos en México.

4.3. CAUDALES CALCULADOS CON EL MÉTODO DE LOS NÚMEROS DE ESCURRIMIENTO

En los ríos que debido a su longitud, gasto, ubicación o interés previo no cuentan con una estación de aforos o datos hidrométricos, se puede estimar el escurrimiento a partir de la pluviometría disponible y las características fisiográficas de la cuenca, mediante el método de Los Números de Escurrimiento (NE), que se describe con la siguiente ecuación (García *et al.*, 1999):

$$Q = CiAc \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal que se produce con una lluvia de intensidad i , a la salida de una cuenca, o a la salida de una porción de cuenca (m^3/s),

C = coeficiente de escurrimiento (adimensional que representa la fracción de lluvia que escurre en forma directa),

i = intensidad de la lluvia (m/s),

Ac = Área de la cuenca o de la fracción de cuenca considerada (m^2).

El coeficiente de escurrimiento puede agruparse con la intensidad de la lluvia para formar el parámetro “lluvia efectiva” (Pe), por lo que la ecuación queda como sigue:

$$Q = PeAc \quad (2)$$

P_e se calcula con la siguiente ecuación (Aparicio, 1992):

$$P_e = \frac{(P - \frac{508}{N} + 5.08)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (3)$$

Donde:

P_e = altura de la lluvia efectiva (cm),

P = altura de la lluvia total en cm (estimada a partir del mayor número posible de datos de precipitación de las estaciones situadas en la cuenca, o las más cercanas a la misma),

N = número de escurrimiento (adimensional),

Las cifras 508, 5.08, 2032 y 20.32 son coeficientes empíricos, y C (ec. 1) se calcula como:

$$C = P_e / P \quad (4)$$

La P_e calculada por el método NE se denomina N , y presenta ciertos límites de aplicación (García *et al.*, 1999). Para la condición:

$P_e/P = 1$ se tiene:

$$\frac{12700}{150P + 127} \leq N \leq 100 \quad (5)$$

La Figura 4.3.1 muestra el comportamiento asintótico del N respecto a la precipitación real (cm). Para cierta combinación de valores de P o N bajos, la altura de lluvia efectiva resultante (P_e) puede ser mayor (arriba de la curva) que la altura de la lluvia mensual. Para evitar esta anomalía, se sugiere una de las dos alternativas siguientes: 1) dar un valor de cero a la (P_e) cuando la altura total de lluvia (P) es tan baja que puede considerársele nula, y 2) en caso de tener un valor de N y P fuera de los límites de aplicación definido por la ecuación (5), entonces para el valor dado de P tomar el valor más cercano de N para cumplir con la condición definida en la ecuación (5) y después con los valores de N y P determinar la P_e con la ecuación (3).

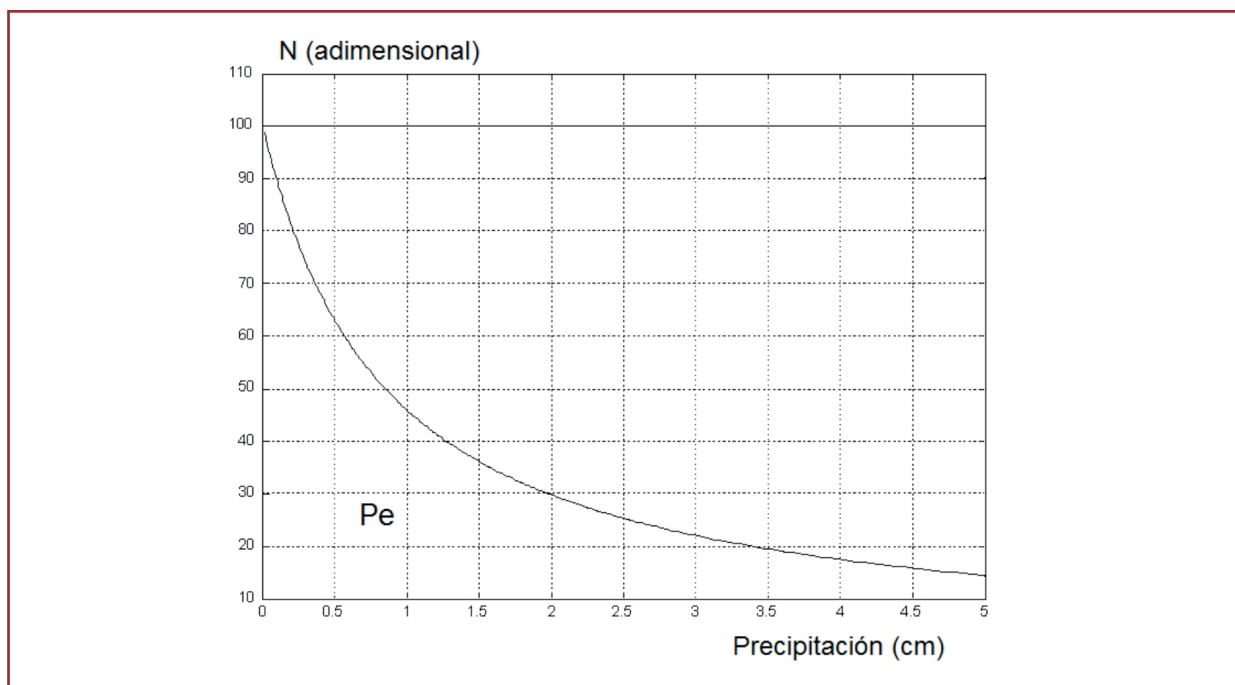


Figura 4.3.1. Límite de aplicación de la ecuación de altura de lluvia efectiva (P_e) (modificada de García *et al.*, 1999).

Para estimar la lluvia efectiva a partir del escurrimiento de la cuenca, se requiere obtener y/o calcular la siguiente información:

1. Precipitación total mensual (promedio de los años con que se cuenta).
2. Tipo de suelo. El dato de entrada es la textura del suelo. Una vez definida la región o subregión fisiográfica de la cuenca, se determina el tipo de suelo mediante las cartas temáticas de la síntesis geográfica (INEGI, 1994). Se define el perfil representativo de las unidades de suelos y se determina el porcentaje de arcilla, limo y arena correspondientes (Tabla 4.3.1).
3. Cobertura vegetal y pendiente del suelo. La infiltración depende del tipo y densidad de la vegetación, y de la pendiente del terreno. El manejo de la tierra (surcos rectos, terrazas, contorno, etc.), modifica el coeficiente de infiltración. Ya determinados el tipo de cobertura vegetal, la pendiente del terreno y el tratamiento y/o uso del suelo (en la cuenca estudiada), se recurre a la Tabla 4.3.2 para obtener **N**.
4. Corrección de **N**. El número de escurrimiento debe corregirse acorde a las condiciones iniciales de humedad

del suelo y la altura de la precipitación acumulada durante los cinco días previos al cálculo de la altura de la precipitación efectiva (*corrección A* en época de secas y *corrección B* en época de lluvias, Tabla 4.3.3).

5. Finalmente, se calcula la altura de lluvia efectiva (*Pe*), con la ecuación (3), y el escurrimiento con la ecuación (2).

4.3.1 CASO DE ESTUDIO: RÍO TEPIC, NAYARIT

El río Tepic (también llamado Mololoa) nace de varios manantiales que escurren desde la porción sur del estado de Nayarit, en las cercanías de San Pedro Lagunillas. Su rumbo general es hacia el noroeste, cruzando la ciudad de Tepic por la zona centro-norte. En su recorrido recibe afluentes de importancia como El Gavilán, Leonel, San Cayetano, Jalisco y Guayaba. Sus márgenes facilitan el uso agrícola.⁴¹ Es el último afluente importante del río Grande de Santiago, confluyendo a él por la margen izquierda a 35 m.s.n.m. en las coordenadas 104° 58' 24" W y 21° 44' 02" N. Su gasto máximo se presentó en septiembre de 1971, con 44.2 m³s⁻¹, y el mínimo en noviembre de 1964, con 0.086 m³s⁻¹ (Bandas-CNA, 1994). El área de la cuenca en la que se estimó la lluvia efectiva mediante **N** es de 590 km² (Figura 4.3.2).

Tabla 4.3.1. Tipos de suelo con base en su textura (modificada de García et al., 1999).

Tipo de suelo	Textura del suelo	Permeabilidad
A	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables	ALTA
B	Arenas finas y limos	MEDIA
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla	BAJA
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizonte de roca sana; suelos muy impermeables	ESCASA

Con base en las cartas estatales de vegetación y suelos del estado de Nayarit (INEGI, 1986), se identificaron 13 tipos de vegetación y siete tipos de

suelo (con sus porcentajes de arcilla, limo y arena) delimitadas mediante polígonos de Tiessen (Tablas 4.3.4 A-L; Figuras 4.3.3, 4.3.4 y 4.3.5, Anexo 1).⁴¹

Tabla 4.3. 2. Valores de N para algunos tipos de suelo (Aparicio, 1992).

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente terreno (%)	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo Cultivos en surco	Surcos rectos	<1	77	86	91	94
	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
	Cereales (sembrados en surcos suficientemente cercanos, de tal manera que la superficie del suelo no esté expuesta directamente a la intemperie)	Surcos rectos	>1	65	76	84
Surcos rectos		<1	63	75	83	87
Contorneo		>1	63	74	82	85
Contorneo		<1	61	73	81	84
Terrazas		>1	61	72	79	82
Terrazas		<1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Contorneo	>1	64	75	83	85
	Contorneo	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizales Pradera permanente Bosques naturales Muy ralo Ralo Normal Espeso Muy espeso Caminos De terracería Con superficie dura		>1	68	79	86	89
		<1	39	61	74	80
		>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
	Contorneo	<1	30	58	71	78
			56	75	86	91
			46	68	78	84
			36	60	70	77
			26	52	62	69
			15	44	54	61
			72	82	87	89
			74	84	90	92

Tabla 4.3.3. Corrección del valor de N (modificada de García *et al.*, 1999).

N	N con corrección A (Estiaje)	N con corrección B (Lluvias)
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.4. La columna I describe las zonas identificadas; la columna II el tipo de vegetación; la columna III el área; y la columna IV los tipos de suelo. La región fisiográfica es Eje Neovolcánico, subprovincia Sierras Neovolcánicas Nayaritas, y los perfiles representativos de las unidades de suelos corresponde a cada subprovincia (INEGI, 1986). Por ejemplo, el Acrisol Húmico fase pedregosa Ah + o (Figura 4.3.4), en sus dos estratos, está compuesto por 52% de arcilla, 17% de limo y 31% de arena, por lo que se consideró tipo C, con alto contenido de arcilla (Tabla 4.3.1 y Tabla 3.3.4 “A”, columna V). Además, se redefinieron subzonas (señaladas como 3a, 3b, 6a, etc., columna I) para diferentes suelos con un mismo tipo de vegetación. Los cálculos del escurrimiento por el método NE, para los meses de febrero a diciembre, se encuentran en el Anexo I (Tablas 4.3.4 A-L).

Con la información del INEGI sobre uso del suelo y tipo de vegetación (Figuras 4.3.3 y 4.3.4), se calcularon los porcentajes de cobertura de tres tipos de vegetación en esta cuenca:

- a) Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria (15%).
- b) Agricultura de temporal y perenne (6%)
- c) Bosque de pino encino (19%).

En la información de la Tabla 4.3.2 “A”, el uso del suelo y el tipo de vegetación permiten tipificar esta cuenca como: selva mediana subcaducifolia; cobertura similar a la de un **bosque natural de pino-encino de espesura normal**; cultivos principales maíz, caña de azúcar y café considerados **cultivos en surco**. Los surcos se disponen en **contorneo** ⁵¹.

En un cuadro de equivalencias entre los tipos de vegetación encontrados en México y en otras partes del mundo (Rzedowski, 1988), la selva baja caducifolia (Sbc) de México tiene un

equivalente al *Deciduous Seasonal Forest*, y la selva mediana subcaducifolia (Smsc) equivale al *Semi-evergreen Seasonal Forest*, o Bosques Tropicales.⁴¹

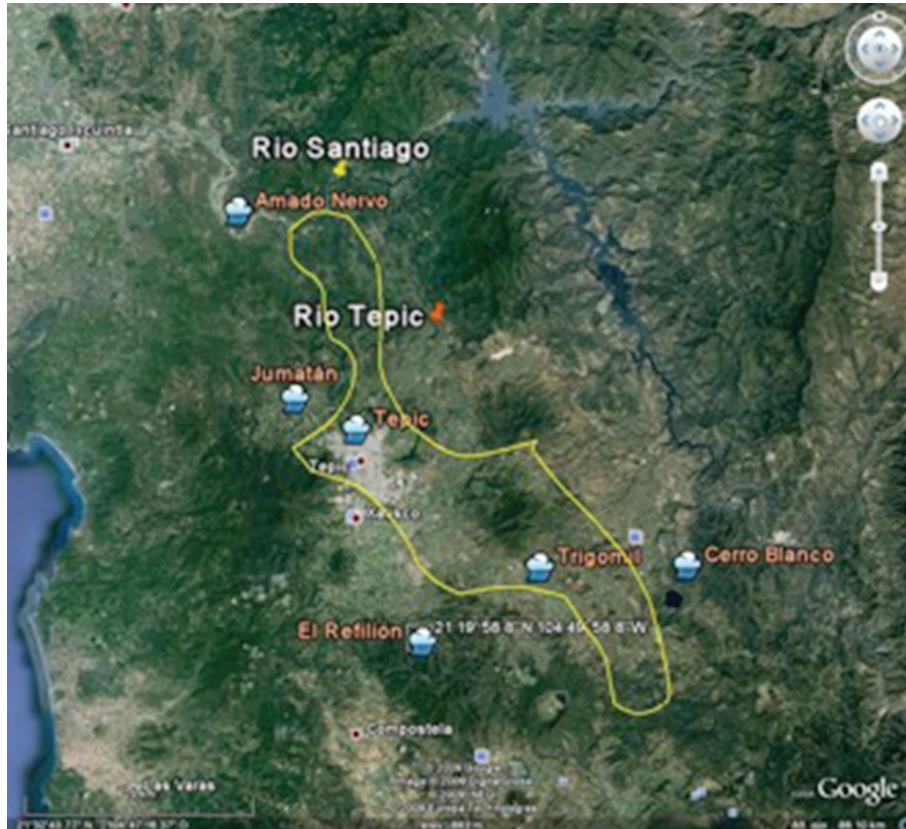


Figura 4.3.2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca seleccionada para calcular la lluvia efectiva por el método de Los Números de Escurrimiento en el río Tepic.

La columna VI de la Tabla 4.3.4 “A” presenta la pendiente predominante en cada zona, solo donde es mayor del 1% (> 1). Con base en estos datos, se selecciona el número de escurrimiento N (Tablas 4.3.2 y 4.3.3) para cada una de las 13 áreas, dando como resultado la columna VII.

Para calcular la precipitación, se emplearon los datos de seis estaciones climatológicas cuyo nombre, ubicación y área de influencia (definida mediante Polígonos de Thiessen), se observan en la Figura 4.3.5. La Tabla 4.3.5 muestra la precipitación del mes de enero, que se incluye

en la columna IX de la Tabla 4.3.4 “A”. Los cálculos de la precipitación mensual para cada zona, considerando el área de influencia de las estaciones se encuentran en el Anexo 2 (Tablas 4.3.5 A-L).⁴¹

En la columna III de la Tabla 4.3.4 “A”, se observa la porción del área cubierta por cada tipo de vegetación bajo la influencia de cada estación pluviométrica. Se obtienen al sobreponer las Figuras 4.3.3 y 4.3.4. La Tabla 4.3.6 presenta un resumen de la precipitación mensual de las seis estaciones pluviométricas.

Tabla 4.3.4"A". Cálculo del escurrimiento para el mes de enero (estiaje), por el método de NE. Cuenca del río Tepic, Nayarit (modificada de García et al., 1999).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zona	Vegetación	Área (m ²) Ac	Tipo de suelo	Tipo de suelo (Tabla 4)	Pendiente terreno	Número escurrimiento N	N corregido	P=altura total lluvia mens. (cm)	Pe = altura lluvia efectiva (cm)	C = coeficiente escurrimiento	Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	4.47	0.3519268	0.078730818	0.006434384
2	Smsc	109 032 000	Ah + o)	C = alto cont. arcilla		70	51	3.1	0.1401748	0.045217664	0.057062179
3											
3a	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.92	0.1713074	0.058666912	0.002490558
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	3.29	0.1109271	0.033716438	0.001637152
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	3.29	0.1109271	0.033716438	0.002810037
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	3.29	0.1109271	0.033716438	0.004031792
6											
6a	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	3.29	0.0817617	0.024851587	0.006519813
6b	At	29 205 000	(Th+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	3.49	0.0088882	0.002546774	0.000969165
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	3.98	0.0456815	0.011477761	0.023436151
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	4.44	0.3430978	0.07727427	0.202043035

Tabla 4.3.4"A". Cálculo del escurrimiento para el mes de enero (estiaje), por el método de NE. Cuenca del río Tepic, Nayarit (modificada de García et al., 1999).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zona	Vegetación	Área (m ²) Ac	Tipo de suelo	Tipo de suelo (Tabla 4)	Pendiente terreno	Número escurrimiento N	N corregido	P=altura total lluvia mens. (cm)	Pe = altura lluvia efectiva (cm)	C = coeficiente escurrimiento	Escurrimiento (m ³ /s)
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	55	3.22	0.0441802	0.01372057	0.008437693
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	5.03	0.0009068	0.000180283	1.91765E-05
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	5.03	0.0009068	0.000180283	1.27844E-05
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	5.03	0.0009068	0.000180283	0.000180283
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	5.03	0.0009068	0.000180283	0.000180283
12											
12a	BQ	12 567 000	(1/2Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.7	0.2140031	0.079260407	0.010040983
12b	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos		60	40	5.03	0.1889074	0.037556133	0.008863496
13	At	4 012 000	Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1		62	2.7	0.0112855	0.004179805	0.000169046
	Ac =	590 000 000					PROM =	3.85	Q = Escurrimiento de la cuenca =		0.326717511

Vegetación: At = Agricultura de temporal; Smsc = Selva mediana subcaducifolia; BQ = Bosque de encino; BP = Bosque de pino; Sbc = Selva baja caducifolia.

Tipo de suelo: (Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso; (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso; (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso; (Bh) = Cambisol húmico; (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso.

Es necesario separar los meses de lluvias y de estiaje para seleccionar el valor “N corregido” de la Tabla 4.3.3. Esta separación se realiza calculando el promedio de los valores de la precipitación total de las Tablas 4.3.5 “A” y B-L del Anexo 2 (última columna). Estos

valores aparecen en la columna IX de las Tablas 4.3.4 “A” y B-L (Anexo). Para facilitar los cálculos, se utiliza el resumen de los 12 meses (Tabla 4.3.6), ubicando los promedios mensuales de la precipitación total en la segunda columna.⁴¹



Figura 4.3.3. Tipos de vegetación en la cuenca del río Tepic (García *et al.*, 1999).



Figura 4.3.4. Tipo de suelo en la cuenca del río Tepic (García *et al.*, 1999).

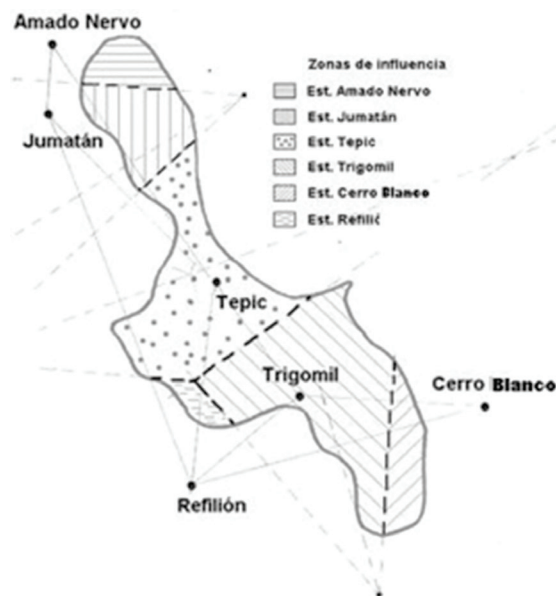


Figura 4.3.5. Estaciones pluviométricas y áreas de influencia de la precipitación en la cuenca del río Tepic (García *et al.*, 1999).

La precipitación mensual en cada estación se obtuvo con base en los datos históricos de las precipitaciones medias de las seis estaciones pluviométricas, como se señala en la Tabla 4.3.6 “A” y Anexo 3 (Tablas 4.3.7 A-F).

Con la altura de lluvia mensual (Tabla 4.3.6, segunda columna) se calcula la precipitación promedio anual, y con este valor se determinan los meses de lluvias y secas de la siguiente forma: si la precipitación promedio anual es menor que la precipitación del mes analizado, entonces se considera mes del periodo de lluvias. De lo contrario, se considera mes del periodo de secas (estiaje). Como se observa en la Tabla 4.3.6 (tercera columna) los meses de lluvias son junio, julio, agosto y septiembre, y los demás son de estiaje. La precipitación efectiva en centímetros (Tabla 4.3.4 A” columna X) se obtiene al sustituir los datos de las columnas VIII y IX en la ecuación (3).⁴²

Ejemplo: Zona 1 (P = 4.47 cm, N = 69)

$$Pe = (P - (508/N) + 5.08)^2 / (P + (2032/N) - 20.32)$$

En la columna XI se observa el coeficiente de escurrimiento que resulta de dividir la

precipitación efectiva (columna X) entre la precipitación total (columna IX).

Donde:

P= altura total de lluvia mensual, cm (columna IX)

N= número de escurrimiento corregido (columna VII)

$$Pe = (4.47 - (508/69) + 5.08)^2 / (4.47 + (2032/69) - 20.32)$$

$$Pe = 0.351926755 \text{ cm}$$

En la columna XI se observa el coeficiente de escurrimiento que resulta de dividir la precipitación efectiva (columna X) entre la precipitación total (columna IX).

Continuando con el ejemplo:

$$\text{Coeficiente de Escurrimiento} = Pe (\text{col. X}) / \text{Altura de lluvia efectiva (columna IX)}$$

$$= 0.351926755 \text{ cm} / 4.47 \text{ cm}$$

$$= 0.078730818$$

Tabla 4.3.5. “A”. Cálculo de la precipitación (enero) en cada zona de influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic (García et al., 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual *	Precipitación x área cubierta	Precipitación total
			(cm)	(cm)	(cm)
1	A. Nervo	100	4.47	4.47	4.47
2	A. Nervo	30	4.47	1.34	
	Jumatán	60	2.38	1.43	
	Tepic	10	3.29	0.33	3.10
3a	Jumatán	40	2.38	0.95	
	Tepic	60	3.29	1.97	2.92

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual *	Precipitación x área cubierta	Precipitación total
			(cm)	(cm)	(cm)
3b	Tepic	100	3.29	3.29	3.29
4	Tepic	100	3.29	3.29	3.29
5	Tepic	100	3.29	3.29	3.29
6a	Tepic	100	3.29	3.29	3.29
6b	Tepic	70	3.29	2.30	
	Trigomil	15	5.03	0.75	
	Refilión	15	2.95	0.44	3.49
6c	Tepic	60	3.29	1.97	
	Trigomil	40	5.03	2.01	3.98
6d	Trigomil	75	5.03	3.77	
	Cerro Blanco	25	2.70	0.67	4.44
7	Tepic	80	3.29	2.63	
	Refilión	20	2.95	0.59	3.22
8	Trigomil	100	5.03	5.03	5.03
9	Trigomil	100	5.03	5.03	5.03
10	Trigomil	100	5.03	5.03	5.03
11	Trigomil	100	5.03	5.03	5.03
12a	Cerro Blanco	100	2.86	2.86	2.7
12b	Trigomil	100	5.03	5.03	5.03
13	Cerro Blanco	100	2.70	2.70	2.70
				PROM =	3.85

* Tablas 4.3.5 B-F, Anexo II.

Tabla 4.3.6. Precipitación media mensual y anual (cm) en la cuenca del río Tepic (modificada de García *et al.*, 1999).

Meses	Precipitación*	Periodo	N Corregido
Enero	3.85	Secas	A
Febrero	1.15	Secas	A
Marzo	0.46	Secas	A
Abril	0.20	Secas	A
Mayo	0.95	Secas	A
Junio	16.28	Lluvias	B
Julio	34.70	Lluvias	B
Agosto	30.83	Lluvias	B
Septiembre	25.32	Lluvias	B
Octubre	8.46	Secas	A
Noviembre	2.06	Secas	A
Diciembre	2.682.06	Secas	A
TOTAL ANUAL	126.9507		
PROM. ANUAL	10.58		

* Precipitación = precipitación mensual de las 13 zonas (Tablas 4.3.5 A-L). TOTAL ANUAL = sumatoria de la precipitación mensual. PROM. ANUAL = precipitación promedio anual.

Tabla 4.3.7. "A". Precipitación mensual en mm. Cuenca del río Tepic, Nayarit. Resumen de los promedios de precipitación de cada una de las zonas de influencia de las estaciones pluviométricas (modificada de García *et al.*, 1999).

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
CERRO BLANCO (35 años, 1963-97)	27.0	9.9	5.5	4.2	7.7	195.9	364.1	301.2	225.0	70.3	17.5	21.2
TRIGOMIL (17 años, 1981-97)	50.3	14.6	2.86	0.25	10.90	169.0	318.2	307.9	257.15	108.14	28.7	29.831
AMADO NERVO (21 años, 1977-97)	44.7	10.21	1.15	1.25	8.42	80.26	350.2	366.1	317.54	76.69	15.50	20.25
TEPIC (44 años, 1949-92)	32.9 9.22	9.22	6.27	1.47	9.00	164.2	371.1	288.4	227.19	69.01	14.49	26.75
JUMATÁN (44 años, 1942-89)	23.8	12.1	6.92	7.0	9.83	154.0	344.4	397.4	380.7	92.92	22.95	28.08
REFILIÓN (15 años, 1969-1983)	29.5	14.53	1.73	0.73	8.73	140.1	284.6	277.2	263.6	63.07	25.13	28.4

La Tabla 4.3.4 "A", columna XII, muestra el escurrimiento calculado ($m^3 s^{-1}$) para cada una de las 13 áreas y para el área total. Este cálculo (precipitación que escurre) se obtiene multiplicando la columna III (Área) por la columna X (altura efectiva), y el resultado se divide entre los 2,678,400 segundos del mes de enero. Continuando con el ejemplo, el volumen de escurrimiento de la zona 1 se calcula de la siguiente forma:

Volumen de PP

$$= 4,897,000 \text{ m}^2 \times 0.00351926755 \text{ m} / 2,678,400 \text{ s}$$

$$= 0.00643438367 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Finalmente, se calculan los escurrimientos de la cuenca para los todos los meses del año (Anexo 1, Tablas 4.3.4 A–L), y en seguida se procede a calcular los caudales naturales y los caudales recomendados utilizando el método de Tennant modificado para las zonas tropicales y subtropicales de México.⁴²

4.3.2 RESULTADOS

La Tabla 4.3.8 muestra los caudales naturales y los caudales ecológicos recomendados para cada mes del año calculados con el método de Tennant modificado, para adaptarlo a las zonas tropicales y subtropicales de México. La Figura 4.3.6 muestra los caudales mínimos óptimos y los caudales naturales.

También deben considerarse los pulsos de caudal altos (60% o 108 m³/s en los picos de lluvias) y las pequeñas inundaciones (200% o 360 m³/s) como lo

exige la metodología propuesta. Este método supone que la calidad del agua cumple con los requerimientos para la conservación de la vida acuática.⁴²

Tabla 4.3.8. Caudales ecológicos del río Tepic (modificada de García *et al.*, 1999).

Mes	Caudal natural (m ³ /s)	Caudal ecológico (m ³ /s)	Días recomendados
Enero	0.327	3.6	31
Febrero	0.953	3.6	28
Marzo	0.030	3.6	31
Abril	0.030	1.8	15
Mayo	0.910	3.6	31
Junio	29.620	5.430	30
Julio	68.160	36.0	7-15
Agosto	61.460	5.430	31
Septiembre	51.880	5.430	30
Octubre	3.090	3.6	31
Noviembre	0.429	3.6	30
Diciembre	0.223	3.6	31

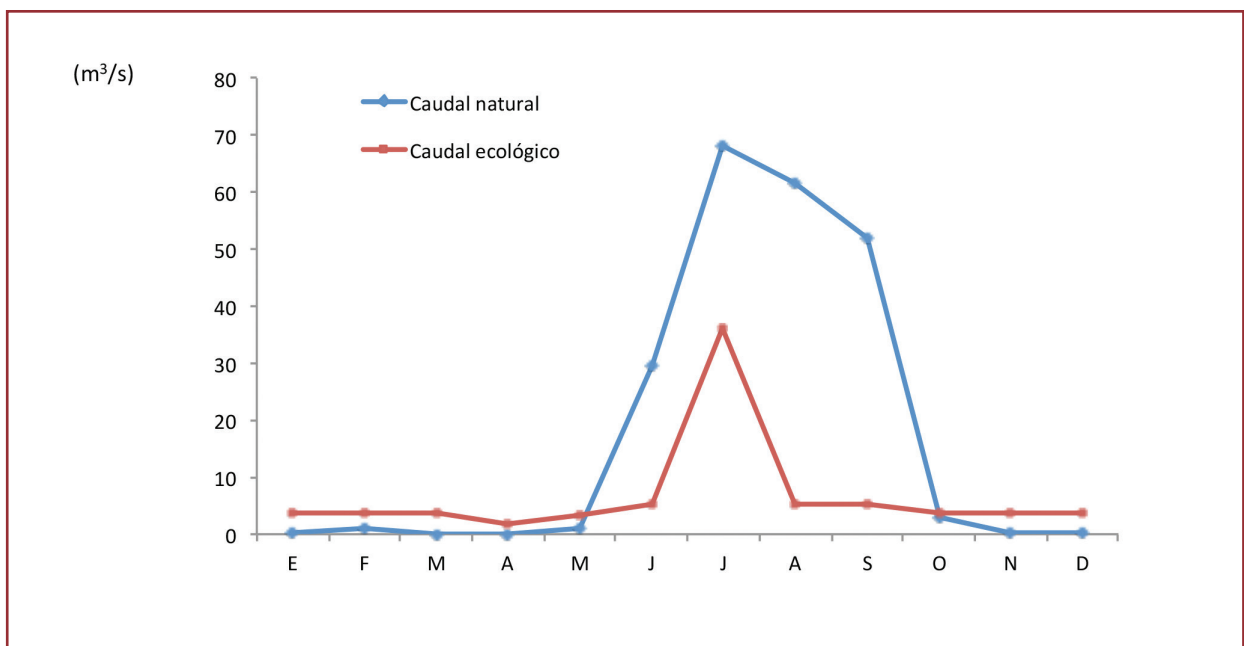


Figura 4.3.6. Caudales naturales y los calculados combinando los métodos de los números de escurrimiento y de Tennant modificado para México (río Tepic; modificada de García *et al.*, 1999).

4.3.3 DISCUSIÓN

En caso de no contar con datos hidrométricos del río de interés, el método de Los Números de Escurrimiento permite estimar los escurrimientos de la cuenca a partir de la información pluviométrica disponible y las características fisiográficas de la cuenca, aunque se pueden utilizar otros procedimientos hidrológicos para estimar el escurrimiento a partir de la lluvia. El caudal ecológico así calculado es de $5.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la época de lluvias (caudal alto), con picos de $108 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante siete días en el mes de agosto (pulsos de caudal alto). Un caudal bajo de $3.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la época de secas; un caudal extremo bajo de $1.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por siete días en el mes de abril, y pequeñas inundaciones de $306 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

De esta manera se logra simular los caudales naturales altos, los pulsos de caudal altos, el caudal bajo, los caudales extremos bajos y las pequeñas inundaciones; todos ellos presentes durante la variación hidrológica estacional.

Conviene señalar que la propuesta de caudales calculados en cualquier estudio como el presente, puede ser redefinida por el administrador de la obra que controla la corriente, siempre y cuando la cantidad de agua que permita fluir sea suficiente para que los peces adultos puedan pasar fácilmente por las zonas poco profundas del río (rápidos) y para que emigren de poza en poza a lo largo de la corriente. No debe olvidarse que se deberá verificar que la calidad del agua sea adecuada para la vida acuática.⁴²

4.4. HIDROPERIODO (INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION, IHA)

Las variaciones anuales del caudal (o régimen de caudales) y del perímetro mojado del cauce se

combinan y dan lugar al término hidroperiodo que, por lo regular, es el factor que marca la diferencia entre la ribera y el cauce del río, y constituye la variable más importante en la estructura del corredor fluvial. El hidroperiodo se define como la inundación de magnitud, duración y frecuencia tal que determina la presencia de ciertas plantas y animales en los diferentes estratos de la ribera y el cauce. El modelo de hidroperiodo es una herramienta útil para el análisis de la distribución anual de la vegetación y de la fauna acuáticas.^{7, 14, 32, 45, 71, 79, 95, 97}

En la relación organismos-hidroperiodo son importantes dos elementos: 1) las condiciones de humedad en diferentes sitios del río, y 2) la adecuación de las especies de plantas y animales en esos sitios. Entre ambas permiten identificar situaciones actuales o predecir alguna situación en sitios con diferentes condiciones de humedad cuando se incluyen en el modelo de hidroperiodo. Los modelos vegetación-hidroperiodo más útiles incluyen: a) la caracterización hidrológica o patrones de corrientes, b) la secuencia de flujos específicos, c) el resumen de la frecuencia-duración de flujos (curva de frecuencias de flujos), y d) los valores representativos de los caudales (descargas máximas o descargas promedio anuales).^{6, 8, 9, 10, 53, 58, 69, 73, 74, 92, 95}

Los modelos de vegetación-hidroperiodo contienen los siguientes elementos:

- La relación entre el flujo y la humedad en los sitios selectos de la zona riparia. Esta relación puede medirse mediante la elevación de la superficie del agua con diferentes descargas (curva nivel de la superficie libre del agua vs. descarga). O puede calcularse mediante varios modelos hidráulicos que consideran la geometría del canal y su rugosidad o resis-

tencia al flujo (*software PHABSIM*). Las diferencias en el nivel del agua sirven para obtener una estimación razonable de las diferentes descargas, incluyendo la de inundación.⁹⁵

- La relación entre el grado de humedad de la ribera y la presencia potencial o actual de la vegetación. Expresa la adecuación de una especie o asociación a un sitio con determinadas condiciones de humedad. Se determina analizando la vegetación en sitios cuya humedad se conoce, y permite deducir la probabilidad de encontrar una planta en un sitio con el mismo grado de humedad.⁹⁵

El modelo de vegetación-hidroperiodo de una corriente se puede formular con los datos hidrológicos e hidráulicos obtenidos para otros fines (v. gr. estabilidad del canal, adecuación del hábitat para los peces o dinámica de los sedimentos). La ribera de sistemas alterados o degradados presenta condiciones de humedad inadecuadas para estimar el caudal histórico o la vegetación deseada. Las estructuras de la vegetación actual e histórica pueden compararse para detectar de manera relativamente fácil la inestabilidad.^{18, 27, 47, 48, 49, 61, 72, 74, 92, 93, 95, 97}

El IHA (TNC, 2006) señala que pueden identificarse condiciones de desequilibrio a través de ciertas características en el ecosistema ribereño. Por ejemplo:

- Si la hidrología del río ha sido alterada o si el caudal ha disminuido por derivación o atenuación de la corriente, la ribera puede secarse y no ser adecuada para el tipo de vegetación histórica registrada o establecida bajo regímenes hidrológicos previos.

- Si las avenidas se han alterado a causa de la inclusión de reservorios, embalses o presas que modifican el cauce y pueden aumentar o disminuir los requerimientos de descarga para inundar las zonas riparias. Los periodos de inundación ya no mantienen las condiciones de humedad de la ribera.
- Si la vegetación de la ribera ha sido alterada por clarear o, en contrapartida, por plantar manchones de vegetación que no son lo suficientemente grandes y que no corresponden a la vegetación original.

En muchos ríos degradados es necesario analizar la relación entre el patrón de corrientes con la humedad y la vegetación del cauce para diseñar y planear la restauración. Dentro de los análisis biológicos de adecuación del hábitat y series de tiempo debe incorporarse la variabilidad estacional en los requerimientos de las especies.^{6, 10, 14, 95} Los eventos extremos son esenciales para el mantenimiento físico de los canales y la adecuación del hábitat a largo plazo para especies adaptadas a las perturbaciones en el ecosistema. Así, la regeneración o germinación de las semillas de ciertas plantas está relacionada con los periodos de grandes inundaciones o sequías, en forma análoga con las semillas de pinos y los incendios forestales.^{9, 17, 18, 53} Tales perturbaciones pueden ser responsables de la destrucción de parte de la vegetación y así mantener las condiciones del dosel adecuadas para la existencia de ciertos hábitats para las especies acuáticas y terrestres.^{8, 15, 16, 27, 52, 55, 57} Con estas bases puede efectuarse la regeneración de pozas, meandros, barreras, aluviones o nuevos depósitos de agua.

Las Series de Tiempo es un método estadístico que permite estimar la frecuencia y magnitud de eventos extremos y describir varios aspectos

de la variación hidrológica. Las características de la corriente afectan la distribución y abundancia de las especies. El análisis de los cambios en las especies de interés requiere de la identificación de los requerimientos de sus fuentes de alimento, o de competidores y predadores, a los que hay que considerar como elementos importantes en los episodios de perturbación.^{38, 77, 96} Además, los estudios limnológicos sugieren que la variación natural intra e interanual del régimen hidrológico es necesaria para mantener la biodiversidad y la evolución potencial del sistema acuático, de la zona riparia y de los humedales. Tal variación genera la necesidad de proteger o restaurar los regímenes de flujos naturales para beneficio de todo el ecosistema.^{10, 50, 52, 53, 55, 56, 62, 66, 79, 95, 98}

El eficiente manejo del sistema acuático, del corredor fluvial y de los humedales requiere de la caracterización de los regímenes de caudales existentes y de utilizar los parámetros biológicamente relevantes, así como de analizar la magnitud del cambio en los regímenes alterados por el hombre con relación a los naturales o preexistentes (anteriores a la alteración hidrológica), y en función de las condiciones y tendencias de la biota existente. El manejo del ecosistema debe considerar la necesidad de mantener y restaurar las características naturales de los regímenes hidrológicos, con la finalidad de ordenar y mantener la integridad del ecosistema.^{8, 10, 14, 55, 68, 70, 73, 94}

El análisis del hidroperiodo con el *software IHA (Indicators of Hydrologic Alteration)* permite:

- 1) caracterizar la variabilidad temporal en los regímenes hidrológicos utilizando los atributos biológicos estadísticamente relevantes, y

- 2) cuantificar las alteraciones hidrológicas asociadas con presuntas perturbaciones (como la operación de una presa, la diversificación de una corriente y la conversión intensiva del uso del suelo en los humedales), al comparar los regímenes hidrológicos de los periodos de pre y posimpacto.^{40, 69, 73, 95}

El *IHA* efectúa una caracterización cuantitativa de los atributos biológicamente relevantes de la hidrología que permitan caracterizar la variación intra-anual del caudal. Luego, aplica dichos atributos en estudios comparativos del régimen hidrológico anterior y, posteriormente, a la alteración del sistema por influencia humana.

La cuantificación de los parámetros hidrológicos representativos o indicadores de alguna alteración hidrológica, se lleva a cabo a través de:

- 1) La definición de los regímenes de caudal para los periodos pre y posimpacto en el ecosistema de interés.
- 2) El cálculo de los atributos hidrológicos para cada año y en cada serie de datos, separados en periodos de pre y posimpacto (32 parámetros relevantes).
- 3) El cálculo de estadísticos interanuales (tendencia central, dispersión) en cada serie de datos de los periodos de pre y posimpacto.
- 4) La comparación gráfica de estos estadísticos. Como, por ejemplo: la comparación del porcentaje del desvío estándar (o coeficiente de variación) de un periodo (preimpacto) respecto al otro (posimpacto). Asimismo, se

compara el estado de alteración del sistema en diferentes tiempos, o en condiciones simuladas basadas en futuras modificaciones del sistema.

Los datos utilizados para estimar los atributos que definen las condiciones diarias promedio del agua (niveles, caudales, tasas de recambio), también pueden utilizarse para evaluar las variaciones mensuales medias. La potencia del método aumenta cuando se utilizan series de datos de muchos años.^{55, 74, 95}

Las condiciones hidrológicas dentro de un ecosistema varían en forma tridimensional y en el tiempo. Pero si el estudio se limita a un punto de interés en el sistema (un lago, un acuífero o un tramo del río), el régimen de los niveles de agua, tasas de recambio, etc., puede definirse en espacio y tiempo en forma hidrográfica.^{6, 57, 66, 75, 95}

El objetivo del *IHA* consiste en caracterizar la variación temporal de las condiciones hidrológicas mediante los atributos biológicamente relevantes y sensibles a la influencia humana (reservorios, bombeo de agua, diversificaciones agrícolas, etc.).⁹⁵ Muchos atributos del régimen hidrológico pueden definir a ciertos hábitats físicos o filtros ambientales, ya que modifican la composición biótica del cauce, humedales y corredores fluviales. Se basan en cinco características fundamentales:

- 1) La magnitud del caudal en un momento dado. Es una medida de la disponibilidad o adecuación del hábitat y define las características del perímetro mojado o el volumen del hábitat, con base en la posición del nivel de la superficie del agua en relación con el cauce, la zona riparia o los humedales.

- 2) La periodicidad del caudal. Puede determinar ciertos requerimientos para completar los ciclos de vida de algunas especies y puede influenciar el grado de estrés o de mortalidad relacionadas con las condiciones extremas de agua (inundaciones o sequías).
- 3) La frecuencia de la ocurrencia de condiciones de caudal extremas (inundaciones o sequías). Pueden estar relacionadas con los eventos de reproducción y mortalidad de las especies, influenciando la dinámica de la población.
- 4) La duración de cierta condición de caudal puede determinar una fase particular del ciclo de vida, o completar el ciclo de vida de una especie, o determinar el grado dentro del cual los efectos de la inundación o la desecación pueden acumularse adecuadamente para beneficio de la biota del río.
- 5) La tasa de cambio en las condiciones hídricas puede vincularse al establecimiento de los organismos riparios, o estar relacionada con su desaparición o con la habilidad de sus raíces para mantener contacto con los suministros del nivel freático.^{6, 7, 8, 14, 15, 16, 71, 74, 95}

La modificación de la frecuencia, duración y periodicidad del caudal puede eliminar las señales que inducen el desove y la migración, o pueden reducir las áreas de desove y crianza. La variación en la frecuencia y duración del nivel del flujo alto puede modificar la sensibilidad del perifiton, fitoplancton, macrofitas, macroinvertebrados, peces y depósitos de huevos, a la velocidad de la corriente.^{8, 38, 61, 70, 83, 84, 98}

El *IHA* representa al detalle al régimen hidrológico para detectar alteraciones. También relaciona ciertas características del nivel de la superficie de agua con las condiciones del hábitat físico dentro del cauce; identifica la magnitud, duración, frecuencia y periodicidad de eventos extremos en el ecosistema, y cuantifica la tendencia central de la magnitud del caudal y la tasa de cambio en sus condiciones.⁹⁵

Al cuantificar el impacto de la perturbación en el régimen hidrológico, se pretende definir si el estado del sistema difiere significativamente al presentarse aquella. El método permite estimar la magnitud del impacto, pero no distingue la interferencia relacionada con las causas del impacto. El *IHA* es un método robusto (utiliza la mediana estadística) y se adapta fácilmente a diseños experimentales sofisticados. La comparación estadística de 32 parámetros de los datos pre y post pone a prueba la hipótesis nula de que la tendencia central y la dispersión de cada grupo de datos no muestran cambio.^{57, 58, 74, 75, 76, 95}

En el río Santiago, los objetivos del análisis de *IHA* comprenden: 1) definir el régimen de caudales y determinar su rango de variabilidad natural (hidroperiodo o pulsos de inundación), 2) establecer los caudales requeridos para simular la variación estacional, 3) asociar el hidroperiodo al funcionamiento del cauce y relacionarlo con los procesos biológicos, y 4) conocer el funcionamiento previo de la presa y las posibles alteraciones hidrológicas posimpacto.

4.4.1 CASO DE ESTUDIO: RÍO SANTIAGO, NAYARIT

El río Santiago se ubica en la vertiente pacífica de la red hidrográfica de México. Su caudal medio anual de 1955 a 1994 fue de $251.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (periodo

preimpacto, 39 años) y de 146.7 de 1995 a 2005 (periodo posimpacto, 11 años). Los caudales mínimo y máximo registrados en este lapso fueron $6.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $4,604 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, en 1984 y 1988 (preimpacto). La vegetación presente, según INEGI (1994), es selva mediana subcaducifolia, con cultivos agrícolas constituidos por maíz, caña de azúcar y café, fundamentalmente. La variación climática anual resulta del patrón de precipitación con lluvias en verano. La presa Aguamilpa controla el caudal en la parte baja del río induciendo fluctuaciones diarias y horarias en los flujos. Los datos diarios de caudal fueron obtenidos de la Estación Hidrométrica Capomal (Núm. 12496), ubicada entre los $21^\circ 82' \text{ N}$ y los $105^\circ 12' \text{ O}$, seleccionada por encontrarse en la parte baja del río y contar con registros hidrométricos de 48 años, que incluyen los periodos de pre y posimpacto (antes y después de la construcción de la presa).

4.4.2 METODOLOGÍA

Los datos hidrométricos (Tabla 4.4.2.1 y Figura 4.4.2.1) se analizaron con el programa *IHA V7 (Indicators of Hydrological Alteration; TNC, 2006)* para definir la tendencia central de la variación temporal de los gastos diarios. Este programa calcula los indicadores intra e interanuales de alteración hidrológica y el rango de variabilidad (RVA, *Range of Variability Approach*) de 32 parámetros hidrológicos en las series de tiempo del caudal medio diario. Los parámetros se clasifican en cinco grupos:

- 1) conteo y duración de pulsos altos y bajos,
- 2) los caudales máximo y mínimo para los periodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días),
- 3) los caudales extremos mínimo y máximo,

- 4) el caudal medio mensual, y
- 5) la asociación de los parámetros a la tasa de recambio.

Estos cinco grupos se asocian a los caudales ambientales extremo bajo, bajo, alto, pulsos altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones (de dos y diez años de retorno). Además analiza los requerimientos del ecosistema acuático y ripario con relación a la variabilidad de los parámetros hidrológicos. El *IHA* analiza paramétricamente (medias y desviaciones estándar), y no paramétricamente (medianas y percentiles), para los años considerados. En las series de tiempo, se compara el comportamiento natural (pre-impacto) con las alteraciones del caudal impuestas por la presa (posimpacto), dentro del rango de variación de cada parámetro en el intervalo \pm una desviación estándar, o entre los percentiles 25 a 75%. Este rango se utilizó para evaluar el desempeño de los caudales ambientales, asignados en la corriente regulada, mediante los posibles escenarios resultantes. La estrategia para aplicar la metodología consistió en:

- 1) ubicar las estaciones hidrométricas del río,

- 2) seleccionar las estaciones adecuadas para determinar el régimen de caudales,
- 3) organizar los datos en días julianos (1-365),
- 4) introducir los datos al software *IHA* y obtener los resultados,
- 5) seleccionar los parámetros críticos,
- 6) comparar la condición actual con la esperada,
- 7) indicar los parámetros hidrológicos relevantes por la alteración de los caudales,
- 8) seleccionar los parámetros del régimen de caudales adecuados para la conservación del ecosistema,
- 9) analizar la condición de actual y la esperada, y
- 10) describir el régimen de caudales del río.

Es importante contar con al menos veinte años de registro para la aplicación exitosa de ésta metodología.

Tabla 4.4.2.1. Ubicación de las estaciones hidrométricas en el río Santiago, Nayarit, México.

Clave estación	Nombre	Colector	Latitud	Longitud	Años de registro
12128	Corona	Río Santiago	20.404	103.083	1926-2002
12359	El Salto	Río Santiago	20.526	103.169	1950-1985,1995
12361	Yago	Río Santiago	21.821	105.072	1940-1958,1960-1963
12400	Las Juntas	Río Santiago	20.732	103.275	1951-1988,1994-1999
12438	La Yesca	Río Santiago	21.193	104.090	1948-1979,1981-1982,1984-2002

Clave estación	Nombre	Colector	Latitud	Longitud	Años de registro
12471	San Cristobal	Río Santiago	21.049	103.443	1951-1959,1995-1999
12472	Arcediano	Río Santiago	20.742	103.281	1951-1968,1971-1979,1981,1989
12473	Santa Rosa	Río Santiago	20.914	103.718	1951-1958,1972-1979,1995-1997
12474	El Sauz	Río Santiago	21.835	104.709	1951-1956
12496	Capomal	Río Santiago	21.825	105.118	1955-2003
12507	Despeñadero	Río Santiago	21.843	104.721	1956-1972
12521	Santa Rosa II	Río Santiago	20.922	103.726	1958-1994,1998-2002
12532	San Cristóbal II	Río Santiago	21.039	103.429	1960-1997,2000-2002
12693	El Carrizal	Río Santiago	21.842	104.775	1962-1990
12757	Paso de Analco	Río Santiago	21.122	103.990	1962-1989

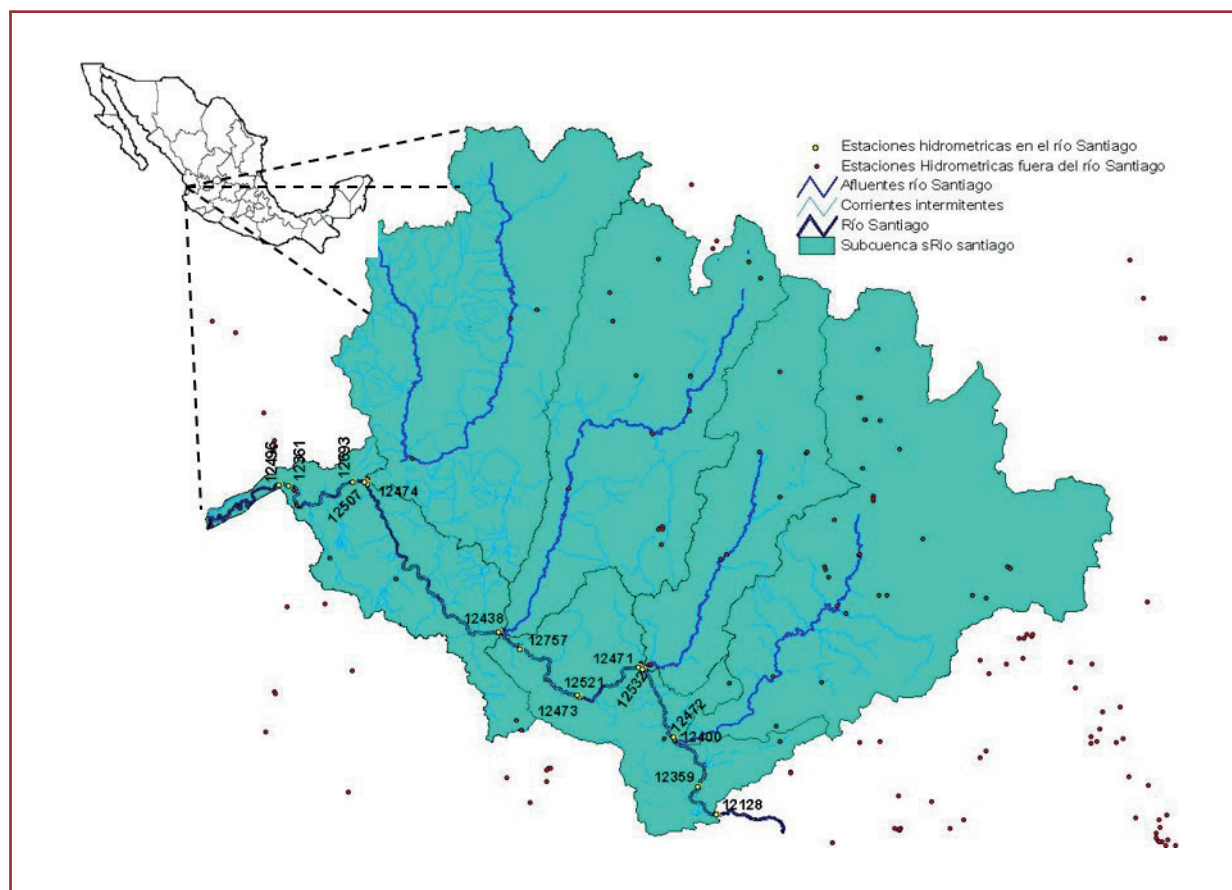


Figura 4.4.2.1. Localización de las estaciones hidrométricas en el río Santiago, Nayarit (cortesía de Marco Mijangos).

4.4.3 RESULTADOS

La comparación de los datos de la estación Capomal indica una modificación en la magnitud y la tasa de variación del régimen de caudales entre los periodos previo a la construcción (1955-1994) y posterior a la construcción de la presa (1995-2005). Los picos coinciden con la periodicidad y duración histórica registrada, pero la magnitud de los caudales altos se encuentra modificada y, con ella, la tasa de recambio de agua (Figura 4.4.3.1).

El software *IHA* permite seleccionar el estimador de la tendencia central (media o mediana) y de la variación (desvío estándar o percentiles) de los parámetros hidrológicos. La mediana es un estimador eficiente de la tendencia central cuando la distribución está sesgada. Además, las pruebas de “t” que utilizan las medianas son aplicables aun cuando se violen los supuestos de normalidad e igualdad de varianza. Por lo tanto, el programa *IHA* utiliza la mediana como estimador de la tendencia central y el coeficiente de variación (desvío estándar/media) para estimar la dispersión.

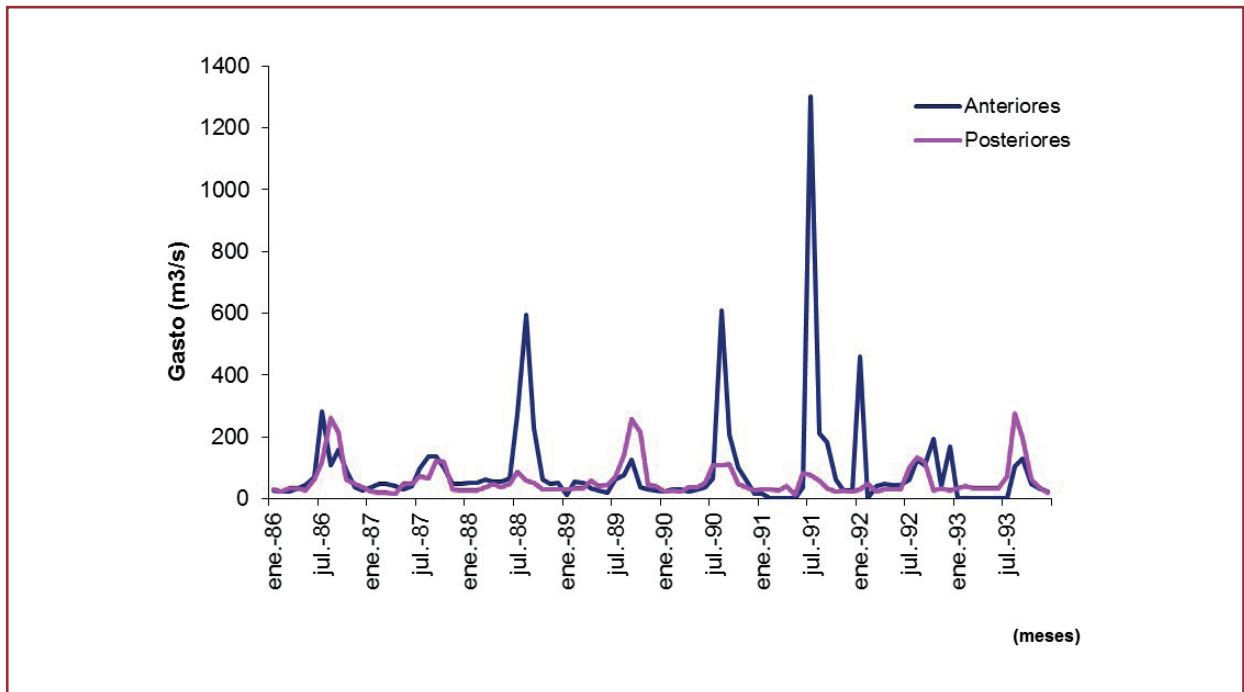


Figura 4.4.3.1. Registros hidrométricos en el río Santiago. En azul, los valores observados antes y, en rosa, después de la construcción de la presa Aguamilpa).

Caudales bajos

La Tabla 4.4.3.1 resume los 32 parámetros hidrológicos para los periodos de preimpacto (1955-1994) y posimpacto (1995-2005).

El Grupo 1 incluye caudales medios mensuales máximos y mínimos, con sus intervalos de

variación; resultados de los RVA (*Ranges of Variability Approach*) y Alteración Hidrológica de los periodos de pre y posimpacto.

El Grupo 2 muestra los resultados de la frecuencia de caudales mínimos y máximos durante 1, 3, 7, 30 y 90 días con sus intervalos de variación; resultados de los RVA y

Alteración Hidrológica de los periodos pre y posimpacto.

El Grupo 3 muestra el caudal mínimo y máximo durante todo el periodo analizado con sus valores de desviación, máximos y mínimos; resultados de los RVA y Alteración Hidrológica de los periodos de pre y posimpacto.

El Grupo 4 muestra la cantidad de pulsos bajos, duración de los pulsos altos, cantidad de pulsos altos, duración de pulsos altos, pulsos umbral bajos, pulsos umbral altos (con sus intervalos de variación; resultados de los RVA y Alteración Hidrológica de los periodos de pre y posimpacto).

El Grupo 5 muestra la tasa de cambio en los caudales, la caída en la tasa de cambio y el número de inversiones en la tasa de cambio (con sus intervalos de variación; resultados de los RVA y Alteración Hidrológica de los periodos de pre y posimpacto).

El método IHA-V7 indica que los RVA (*Range of Variability Approach*, o Cuantificación de los Rangos de Variación) definen el grado de alteración respecto al régimen natural para cada grupo de caudales.⁹⁴ El programa calcula la frecuencia esperada con la cual los valores anuales posimpacto caen dentro de cada una de tres categorías definidas por el usuario, correspondientes a los percentiles 33, 66 y 99%, y compara esta frecuencia contra la esperada (o preimpacto):

(Frecuencia Observada–Frecuencia Esperada)/Frecuencia Esperada

Si el cociente es >0 (máximo a infinito) significa que hubo alteración hidrológica, ya

que la frecuencia de los valores en los grupos se ha incrementado entre los periodos de pre y posimpacto, mientras que un valor negativo significa que la frecuencia de los valores ha disminuido (valor mínimo de -1).

Las Figuras 4.4.3.2 a 4.4.3.7 (obtenidas de la aplicación del *software IHA*), muestran los cambios experimentados por los caudales bajos en los periodos pre y posconstrucción de la presa. La línea punteada muestra los valores promedio y las líneas continuas señalan los percentiles 25 y 75 por ciento.

La Figura 4.4.3.2 muestra la modificación en la duración del caudal bajo. En el periodo posimpacto la duración promedio de los caudales bajos disminuyó de 94 a 55 días, como consecuencia de la alteración del ciclo hidrológico natural.

La Figura 4.4.3.3 muestra la disminución en la tasa de cambio (velocidad de los caudales) bajos pre y posimpacto. Los promedios respectivos son $-5.58 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ día}^{-1}$, y $-9.84 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

La Figura 4.4.3.4 muestra el decremento en la frecuencia de los caudales bajos entre los periodos de pre y posimpacto. La alteración observada en la gráfica no es tan evidente como la comparación de los promedios.

La Figura 4.4.3.5 muestra la modificación de la periodicidad en los caudales bajos en los periodos pre y posimpacto. Es de esperarse que la variación en la periodicidad se dé principalmente en la temporada de secas, sin embargo, la operación de la presa homogeniza el caudal, aumentándolo en esta temporada.

Tabla 4.4.3.1. Registros hidrométricos en el río Santiago. En azul los valores observados antes y, en rosa, después de la construcción de la presa Aguamilpa (1955-1994 y 1995-2005), utilizando promedios diarios en m³s⁻¹).

CAPOMAL	Preimp. 1955-1994 Mediana	SD	Min.	Max.	Postimp. 1995-2005 Mediana	SD	Min.	Max.	RVA Bajo	RVA Alto	Alteración hidrológica (Media)
Grupo #1											
Abril	40.09	1.15	3.28	1458	97.06	1.272	39.64	188	25.01	61.69	0.03896
Mayo	38.8	1.057	9.3	1458	160.2	0.8234	50.85	237	27.66	55.57	-0.7403
Junio	79.12	1.308	14.58	1458	177.9	0.8221	41.56	308.1	55.44	122.1	-0.2208
Julio	420.6	0.9121	19.56	1670	112.9	2.24	62.37	419.1	337.6	583.9	-0.4805
Agosto	695.6	0.7724	19.75	1659	130.1	1.316	65.57	429.8	426.2	844.5	-0.7403
Septiembre	564.3	0.9052	42.9	1953	187.4	1.758	113	904.0	442.9	735.9	-0.4805
Octubre	205.9	1.063	15.65	1047	118.2	1.659	55.37	508.6	122.5	297.6	-0.2208
Noviembre	63.95	0.5837	7.425	718.4	82.01	0.602	38.07	260.2	51.81	78.67	0.03896
Diciembre	52.17	0.8566	12.21	641.9	55.38	0.7644	37.05	123.5	42.77	64.17	0.5584
Enero	56.28	0.8963	7.6	680.3	47.7	0.2939	36.79	78.95	42.02	77.29	1.078
Febrero	44.63	1.012	11.42	251.2	48.24	0.2283	30.73	108.8	33.73	63.19	1.338
Marzo	41.24	1.23	5.72	236	55.36	0.6171	29.57	121	28.71	61.96	0.8182
Grupo #2											
1-día mín	17.4	1.694	0.46	64.86	25.72	0.3635	14.15	47.5	5.429	23.2	0.03896
3-días mín	20.28	1.588	0.98	65.51	30.12	0.1787	17.87	53.84	7.368	27.93	-0.2208
7-días mín	22.53	1.541	2.226	66.82	33.52	0.2516	20.84	57.71	9.847	33.37	0.2987
30-días mín	25.49	1.396	2.806	74.35	44.58	0.2824	30.53	72.66	15.21	43.61	0.2987
90-días mín	41.62	0.9685	11.3	94.19	51.49	0.1472	39.37	95.38	31.19	56.28	1.338
1-día máx	1687	0.8207	310.5	4711	608.1	0.5794	171.9	3395	1316	2257	-0.7403
3-días máx	1461	0.6806	221.4	4461	581	0.4516	139	3091	1138	1893	-0.7403
7-días máx	1255	0.5599	180.1	3318	453	0.6486	121.4	2423	999.2	1498	-0.7403
30-días máx	927.9	0.6435	117.6	2430	337.9	0.7415	118.3	1238	760	1137	-0.7403
90-días máx	697.9	0.5981	58.76	1575	255.1	0.7141	110.3	635.8	540.4	796.9	-0.4805
Núm. 0 días	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ind. Caud.Base	0.1037	1.295	0.01063	0.2556	0.2456	0.7495	0.08692	0.4988	0.05396	0.1358	-0.7403

CAPOMAL	Preimp. 1955-1994 Mediana	SD	Min.	Max.	Postimp. 1995-2005 Mediana	SD	Min.	Max.	RVA Bajo	RVA Alto	Alteración hidrológica (Media)
Grupo #3	94.5	0.1025	1	342	55	0.1503	10	353	91	111.9	-0.5455
Dato min	245	0.1079	14	350	26	0.235	90	300	234.6	247.4	-0.7403
Dato max											
Grupo #4											
Cant.Puls.Bajos	5	1.75	0	29	7	1.429	0	21	2	8	0.1364
Dur.Puls.Bajos	5	1.5	1	132	1.25	1	1	3	3	7	-0.4406
Cant.Puls.Altos	4.5	1.5	1	12	11	1.091	0	19	2.53	7	-0.7861
Dur.Puls.Altos	6.25	7.26	38.07	175	2	0.25	1	4	3.5	16.23	-0.7576
Pul.Umb.Bajos			295.1								
Pul.Umb.Altos											
Grupo #5											
Tasa. Cambio	6.18	0.7864	0.621	44.29	14.57	1.021	0.2663	37.76	4.542	8.19	-1
Caída Tasa	-5.575	-1.353	-27.07	-0.3814	-9.84	-0.9248	-30.66	-5.53	-7.537	-4.077	-0.4805
Núm. Invers	163.5	0.2645	2	185	162	0.216	85	184	148.1	169	-0.3182

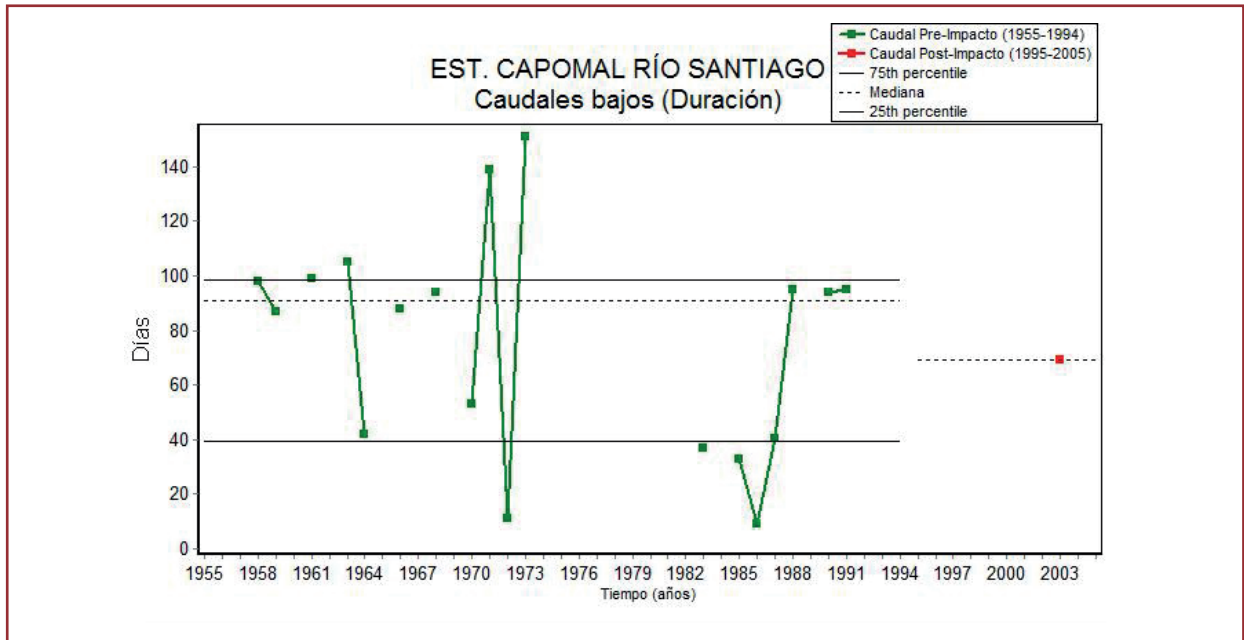


Figura 4.4.3.2. Duración de los caudales bajos. Pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

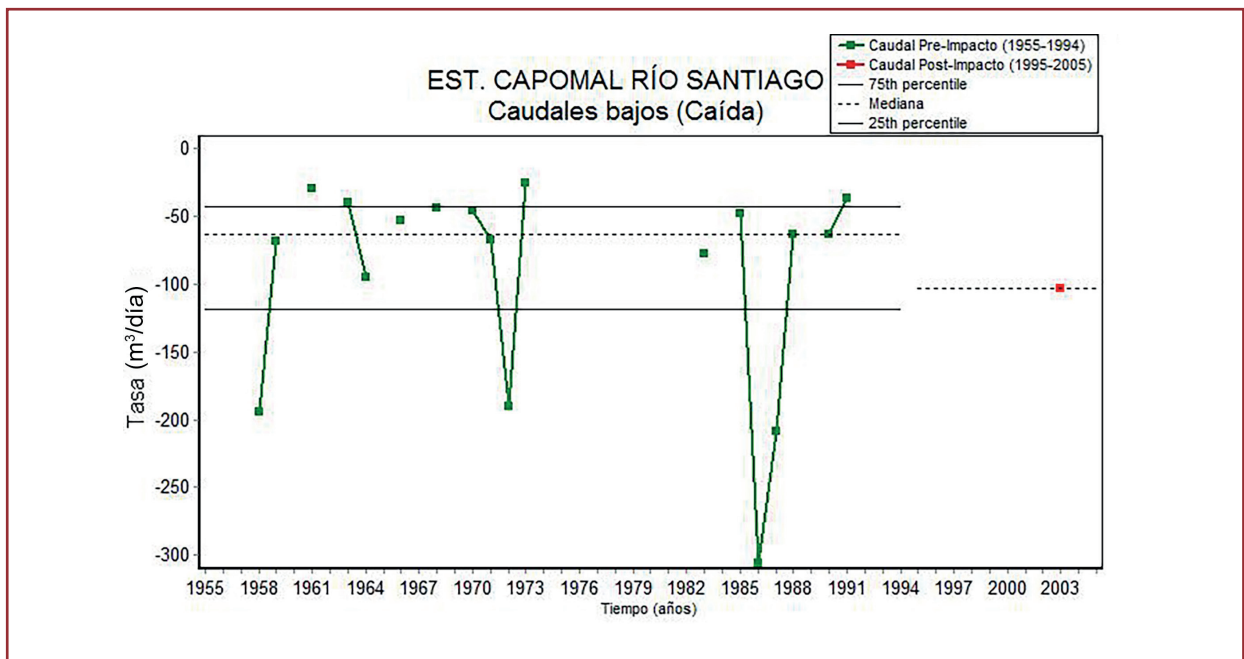


Figura 4.4.3.3. Disminución de la tasa de cambio de los caudales bajos en pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la presa Aguamilpa.

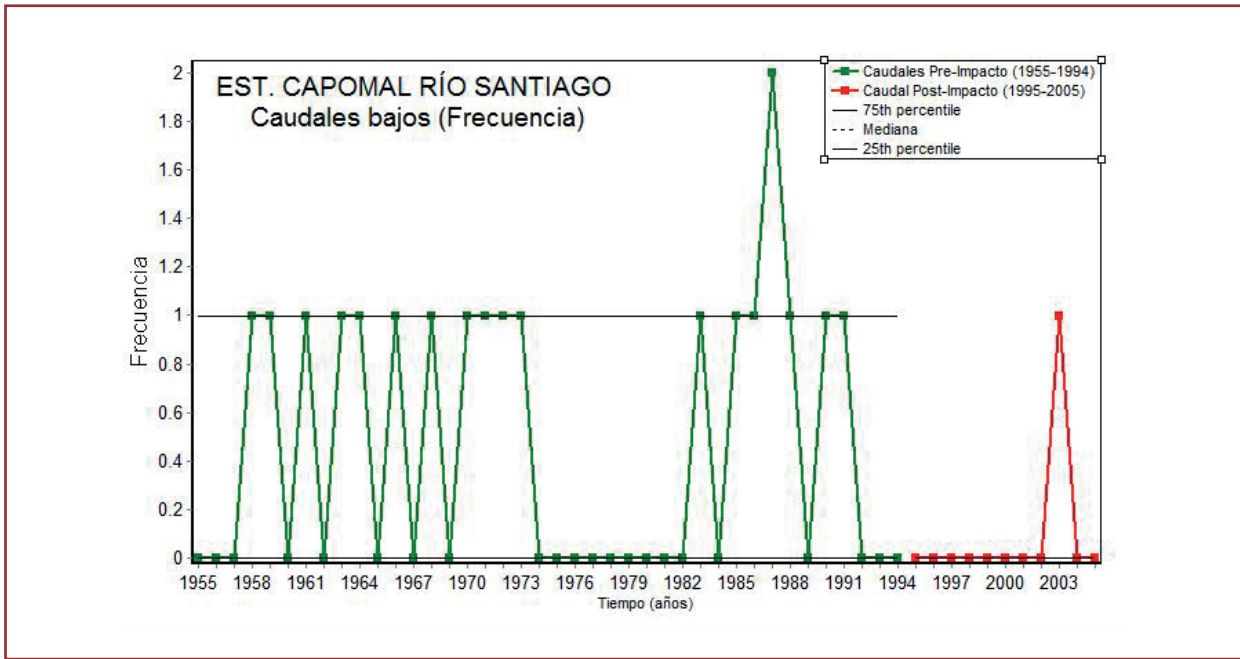


Figura 4.4.3.4. Frecuencia de los caudales bajos, para los periodos pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

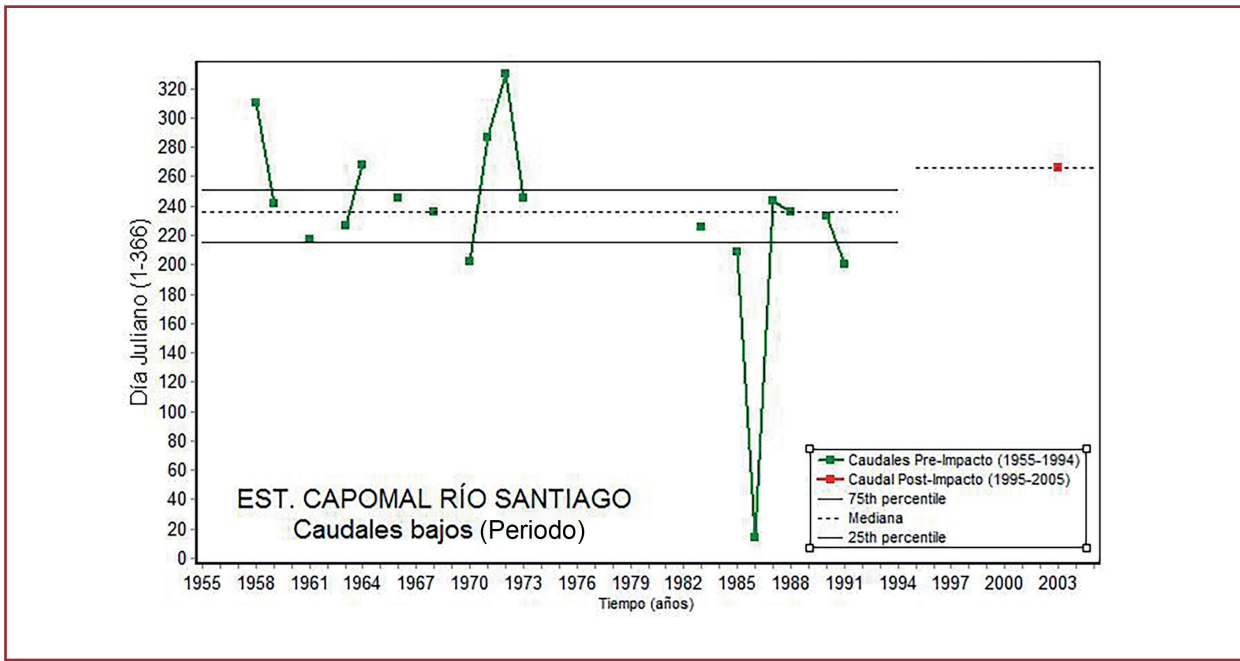


Figura 4.4.3.5. Periodicidad de los caudales bajos. Pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.6 se muestra el comportamiento de los picos de caudal bajo para los periodos de pre y posimpacto. Los picos de caudal bajo desaparecen en el periodo de

posimpacto porque son reemplazados por un caudal constante relativamente mayor, lo que se traduce en una alteración del ciclo hidrológico natural del río.

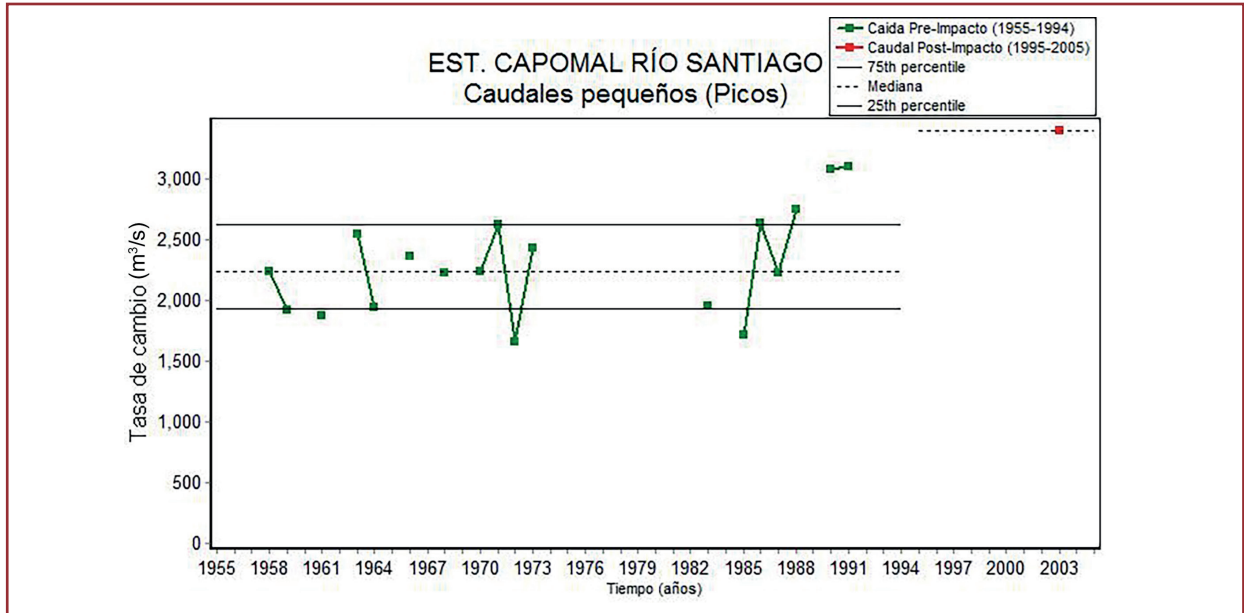


Figura 4.4.3.6. Comportamiento de los picos de caudales, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.7 se muestra el comportamiento de la tasa de cambio de los caudales bajos para los periodos de pre y posimpacto. Existe una

alteración en la tasa de cambio de los caudales bajos mismos que desaparecen en el periodo de posimpacto debido a la operación de la presa.

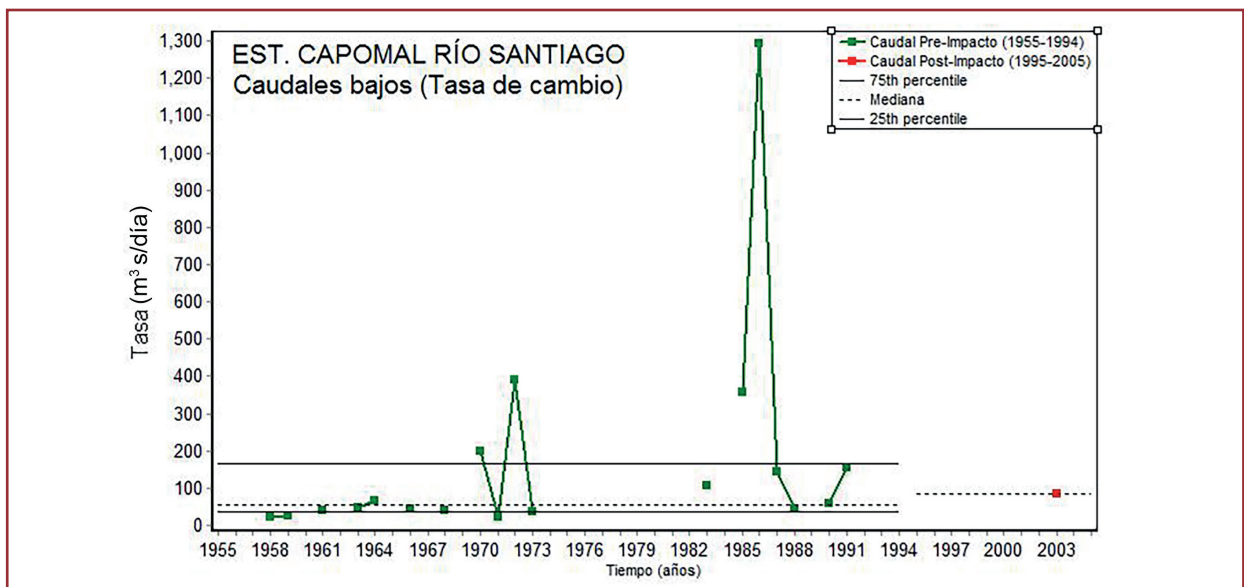


Figura 4.4.3.7. Comportamiento de la tasa de cambio los caudales bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

Los caudales bajos son necesarios en los ríos porque con frecuencia constituyen el gatillo que dispara nuevas etapas en los ciclos de vida de varios insectos, así como la migración y el desove de los peces, y proveen de áreas para la crianza de sus estados juveniles en las pequeñas charcas que funcionan como sitios de alimentación. Asimismo, mantienen la humedad en las orillas del canal principal, favoreciendo la diversidad de la vegetación de galería puesto que sus especies tienen diferente tolerancia a la desecación. Así, estos caudales bajos determinan la distribución y abundancia de la vegetación y, al mismo tiempo, depositan continuamente nutrientes en estas zonas.^{8, 10, 14, 38, 58, 64, 70, 95}

4.4.3.1. Caudales extremos bajos

Los caudales extremos bajos son responsables del reclutamiento de ciertas especies de plantas en la base del canal principal, a la vez que efectúan la purga invasiva de especies introducidas en las comunidades riparia y acuática. Estos caudales también concentran a

los organismos presa dentro de zonas limitadas para beneficio de los predadores.^{10, 65, 76, 79, 94, 95,}
⁹⁹ En el Santiago, los caudales extremos bajos se perdieron con la política de manejo de la presa (pasaron de 3.28 a 19.75 m³s⁻¹, en promedio), lo que modificó el ciclo hidrológico del río (Figuras 4.4.3.1.1), propiciando la pérdida de especies nativas y la invasión de especies introducidas más tolerantes (*Micropterus salmoides*, *Lepomis macrochirus*).

Asimismo, en la Figura 4.4.3.1.1 se observa que los picos de los caudales extremos bajos ya no aparecen en el periodo posimpacto, pues el caudal es más alto y constante.

En la Figura 4.4.3.1.2 se observa la disminución de la duración de los caudales extremos bajos en el periodo posimpacto, alterando el ciclo hidrológico natural del río.

En la Figura 4.4.3.1.3 se observa la pérdida total en la periodicidad de los caudales extremos bajos.

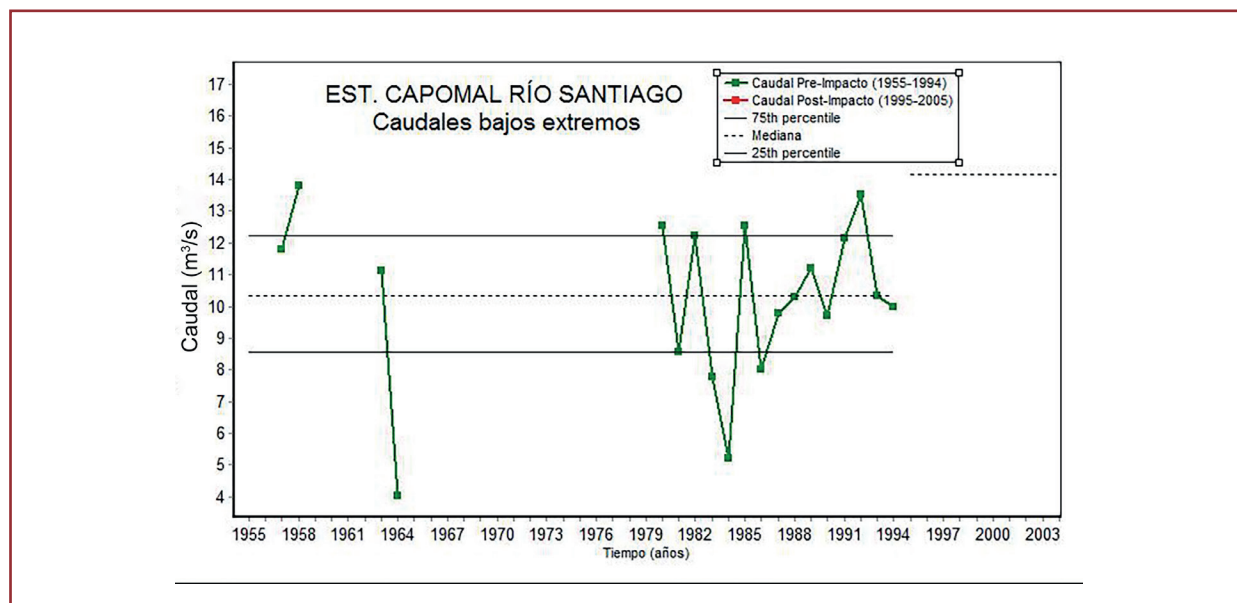


Figura 4.4.3.1.1. Magnitud de los caudales bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

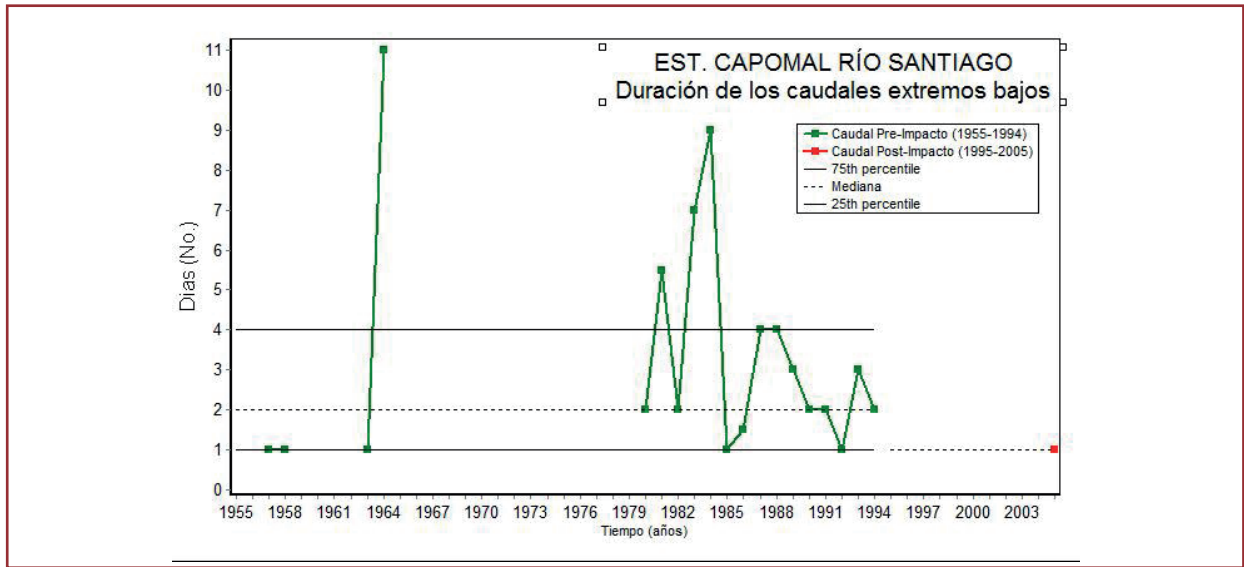


Figura 4.4.3.1.2. Duración de los caudales extremos bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

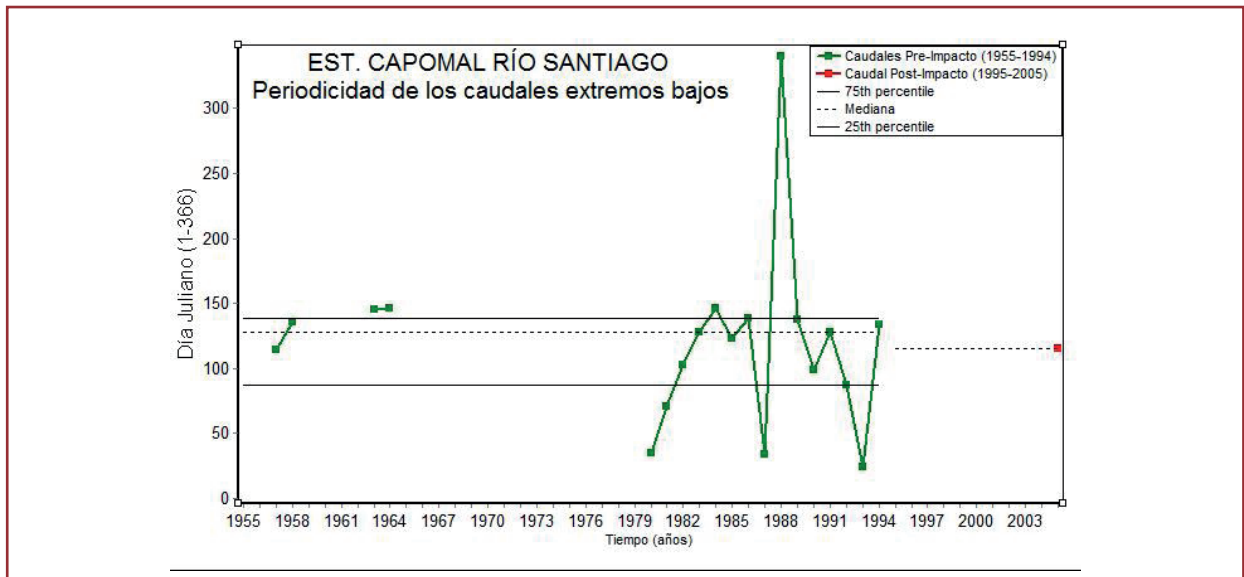


Figura 4.4.3.1.3. Periodicidad de los caudales extremos bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.1.4 se observa la disminución en la frecuencia de aparición de los caudales extremos bajos en el periodo de posimpacto. Al parecer, en el periodo preimpacto dicha frecuencia tendía a aumentar, o los registros de la estación hidrométrica se refinaron.

4.4.3.2. Pulsos de caudal altos

La duración, magnitud, periodicidad y tasas de recambio de los pulsos de caudal alto son importantes porque mantienen la forma física del cauce, incluyendo las charcas y barreras;

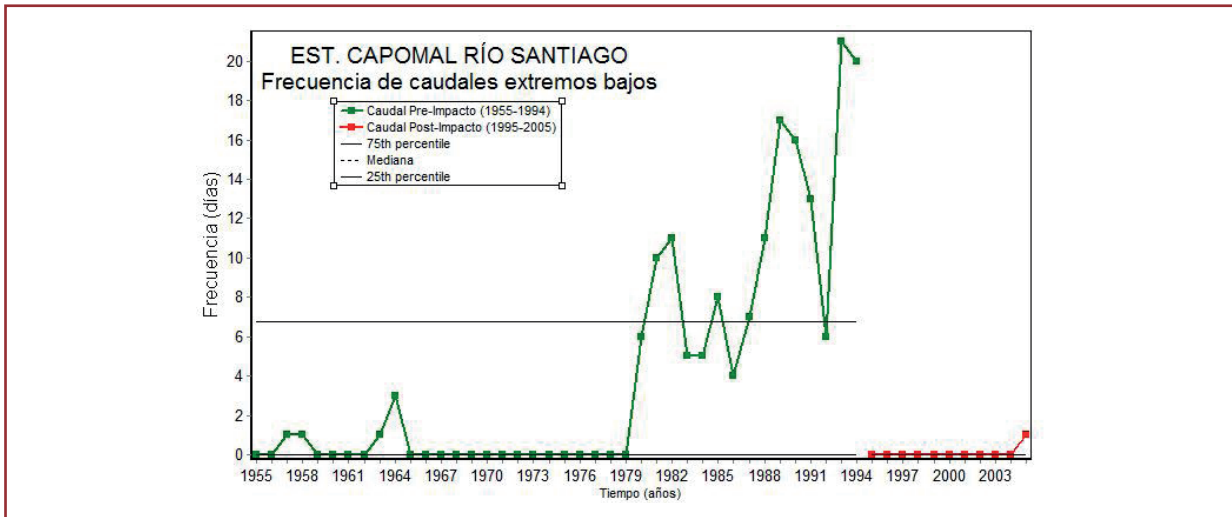


Figura 4.4.3.1.4. Frecuencia de los caudales extremos bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

determinan la distribución, tipo y tamaño de los depósitos de arena, grava y rocas, y previenen la invasión o colonización de la vegetación riparia dentro del canal. Estos pulsos de caudal alto restauran la calidad del agua después de los periodos de caudales bajos, puesto que limpian el cauce de basura, desperdicios y contaminantes de origen natural y antropogénico, y mantienen el balance de salinidad en el estuario. Un pulso de caudal alto oxigena los huevos depositados por los peces entre la grava y previene su desecación.^{6, 14, 16, 53, 54, 56, 69, 95}

La operación de la presa Aguamilpa, para generar energía eléctrica, incrementó la frecuencia anual de los pulsos de caudal alto (Figuras 4.4.3.2.1), pero homogenizó su duración, tasa de recambio y magnitud (Figuras 4.4.3.2.2 a 4.4.3.2.6). Cabe esperar que este nuevo régimen afecte a la forma del canal, el tipo de especies riparias y acuáticas, y la fauna de macroinvertebrados, así como los mecanismos que disparan el comportamiento para el desove y la migración. En promedio anual, se tienen 4.5 pulsos de caudal altos para el periodo preimpacto y de 11 pulsos de caudal alto para el periodo posimpacto.

La Figura 4.4.3.2.2 muestra la velocidad del cambio diario de caudal en los pulsos altos. Las unidades del eje de las ordenadas indican que el cambio es negativo, o sea, hay un frenado o desaceleración en la velocidad del flujo ($m^3s^{-1}día^{-1}$). En el periodo preimpacto dicha velocidad era de $-28 m^3s^{-1}día^{-1}$. Para el periodo de posimpacto se observa un aumento en el frenado del flujo, que cambia a un promedio de $-38 m^3s^{-1}día^{-1}$. Un frenado en la velocidad de la corriente implica un mayor depósito de sedimentos en el cauce.

La Figura 4.4.3.2.3 muestra el número de días en los que se presentan los pulsos de caudal alto en el río. En 1976 se presentaron cerca de 180 días con pulsos altos. Sin embargo, durante el periodo posimpacto se observa un decremento en la duración de estos pulsos, señalado en la gráfica con rojo y con valores cercanos a cero. El resultado es una homogenización del caudal aguas debajo de la presa.

La Figura 4.4.3.2.4 muestra la periodicidad con la que se presentan los pulsos de caudal alto. La línea punteada para los valores preimpacto

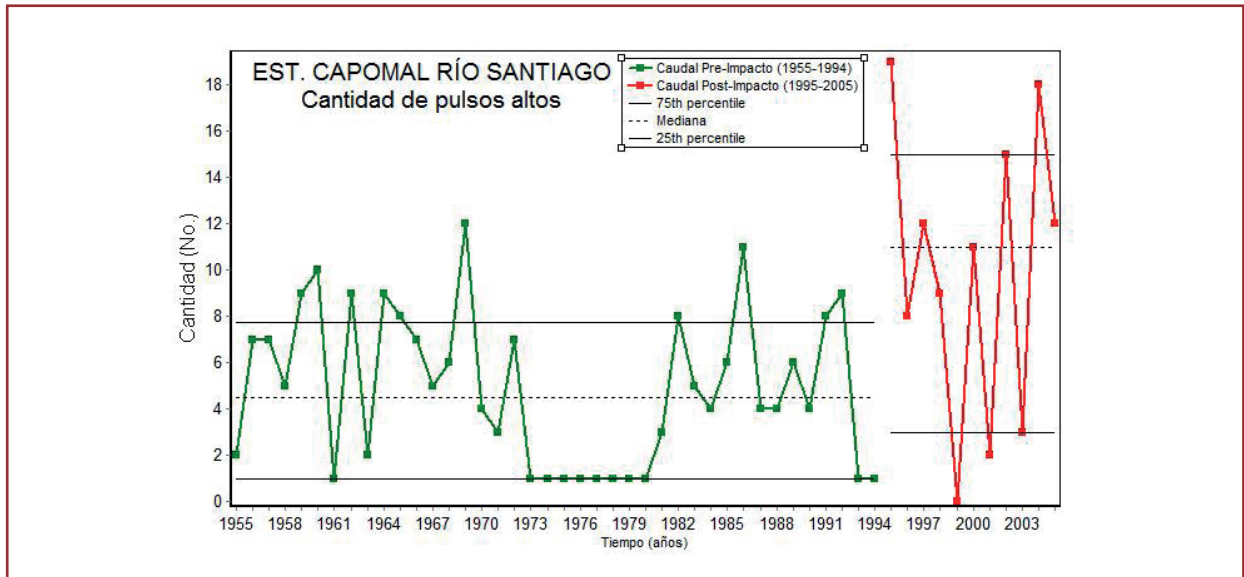


Figura 4.4.3.2.1. Número de pulsos de caudal alto, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

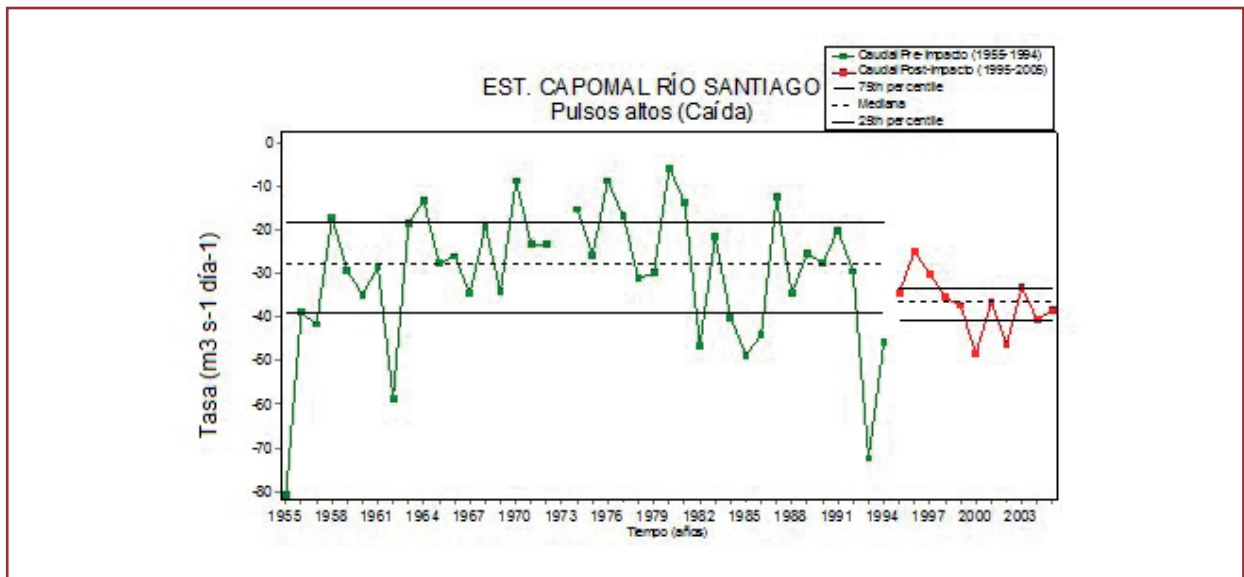


Figura 4.4.3.2.2. Inversión de los pulsos de caudal alto, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

(verde) muestra el día 250 (a mediados de agosto) para la aparición de los pulsos de caudal alto, en comparación con el día 200 (junio-julio) del periodo de posimpacto (en rojo), indicando la aparición temprana en el año de los pulsos altos debido al desfogue de la presa previo a las

avenidas provocadas por las lluvias, para evitar el riesgo de un desbordamiento.

Los cambios diarios en los pulsos de caudal alto se observa en la Figura 4.4.3.2.5. Tiene las mismas unidades que la Figura 4.4.3.2.2

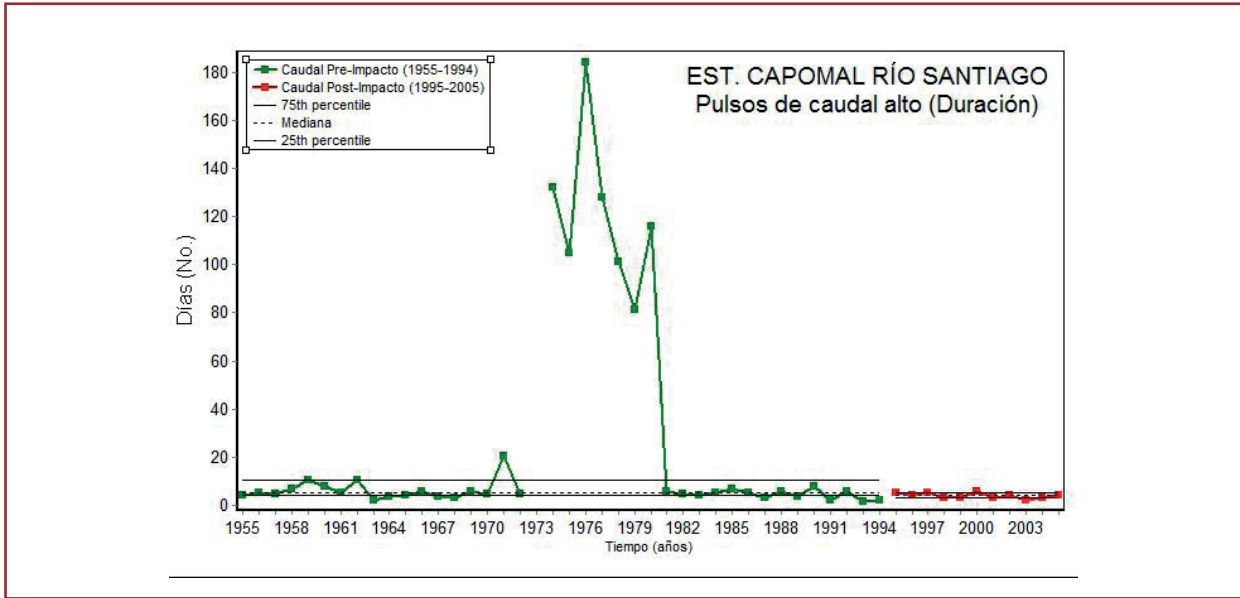


Figura 4.4.3.2.3. Duración de los pulsos de caudal alto, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

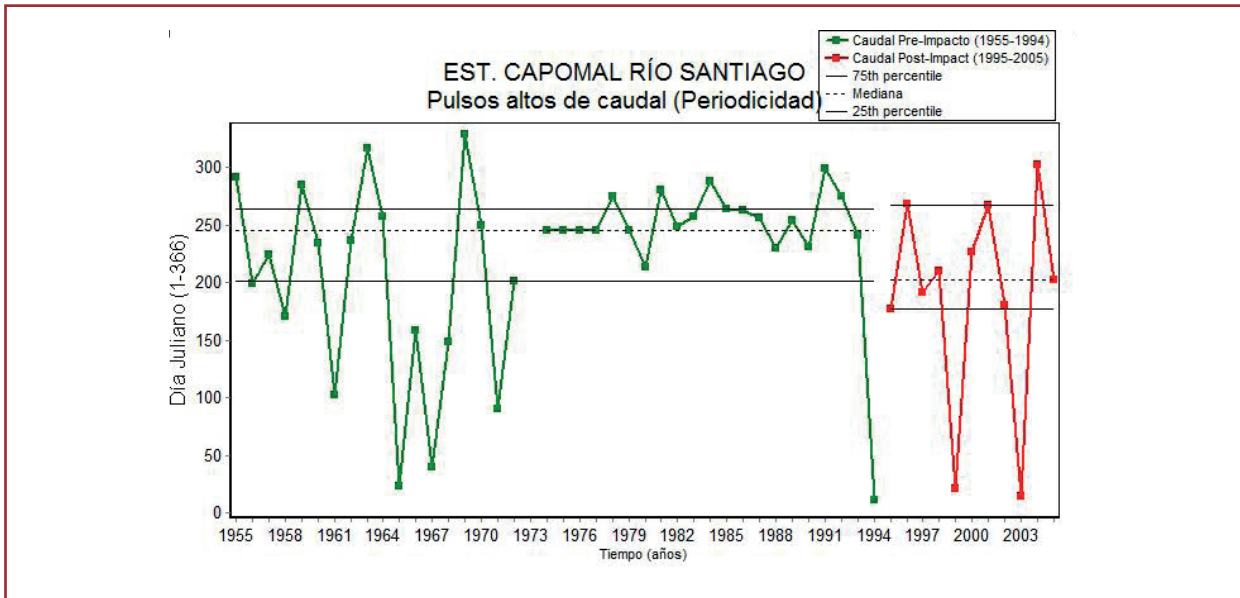


Figura 4.4.3.2.4. Periodicidad anual de los pulsos de caudal alto, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

($m^3/s \text{ día}^{-1}$), pero se trata del proceso inverso. El periodo posimpacto (rojo) señala una alteración en el sentido de la atenuación de la tasa de recambio con valores que oscilan entre los

30 y $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{día}^{-1}$ para el percentil 25 y 75%, respectivamente, en comparación con los 22 y $69 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{día}^{-1}$ de los percentiles 25 y 75% del periodo de preimpacto (verde).

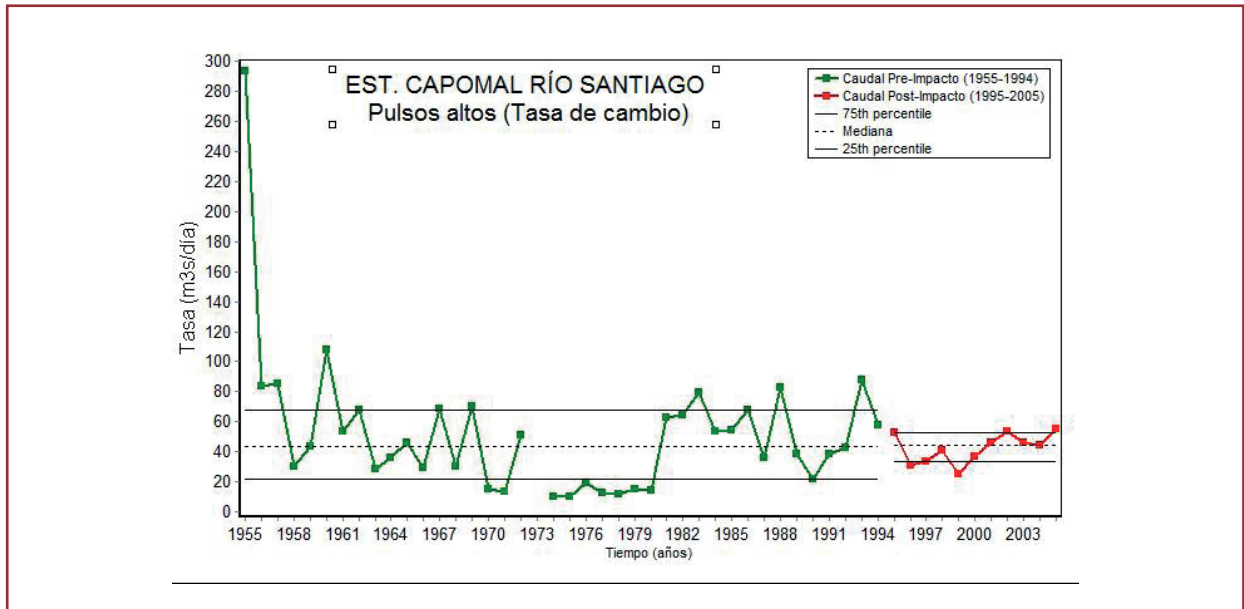


Figura 4.4.3.2.5. Tasa anual de cambio de los pulsos de caudal alto, pre (1955-1994) y pos (1955-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.2.6 se observa el comportamiento de los picos de los pulsos de caudal alto. El periodo preimpacto presenta un promedio cercano a los $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que oscilan entre los 200 a 490

m^3s^{-1} para los percentiles 25 y 75% (verde). El periodo posimpacto muestra un abatimiento a los $210 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que oscila entre 150 y $235 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para los percentiles 25 y 75%, respectivamente (rojo).

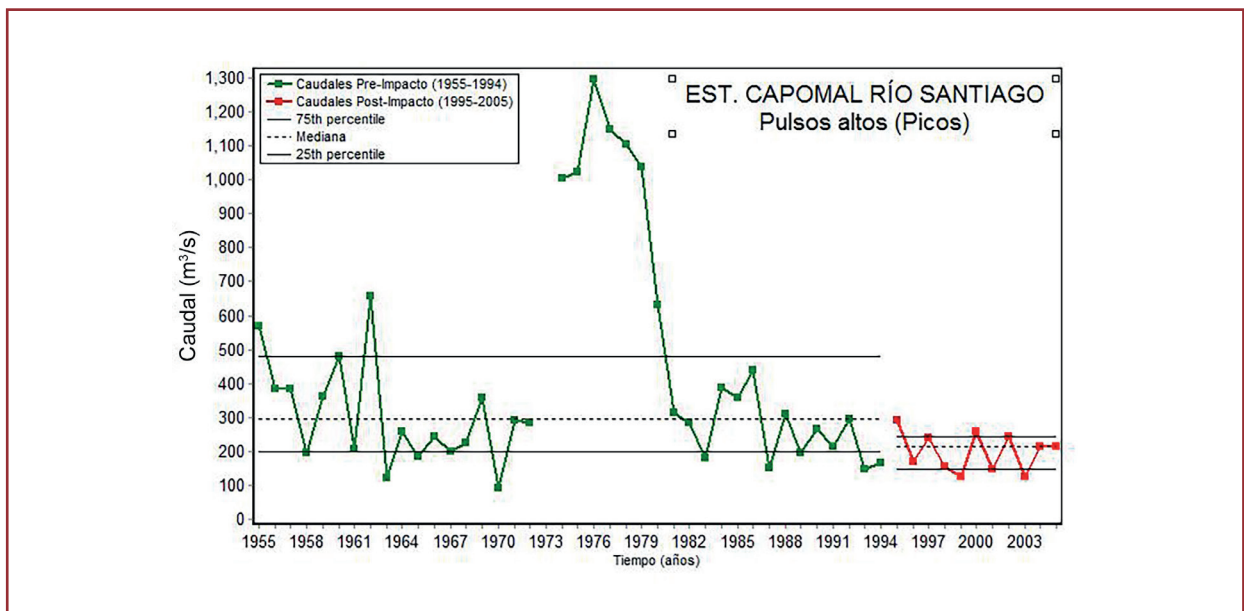


Figura 4.4.3.2.6. Magnitud de los pulsos de caudal altos, pre (1955-1994) y pos (1955-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

4.4.3.3. Pulsos de caudal bajos

Las Figuras 4.4.3.3.1 a 4.4.3.3.3 muestran la duración, cantidad y momento de aparición de los pulsos bajos pre y pos a la construcción de la presa. Junto con los caudales altos determinan las condiciones del hábitat y

disparan los mecanismos fisiológicos de los comportamientos de migración y desove de muchas especies acuáticas.⁹⁵

La Figura 4.4.3.3.1 muestra la caída hasta valores cercanos a cero en la duración de los pulsos de caudal bajos para el periodo posimpacto.

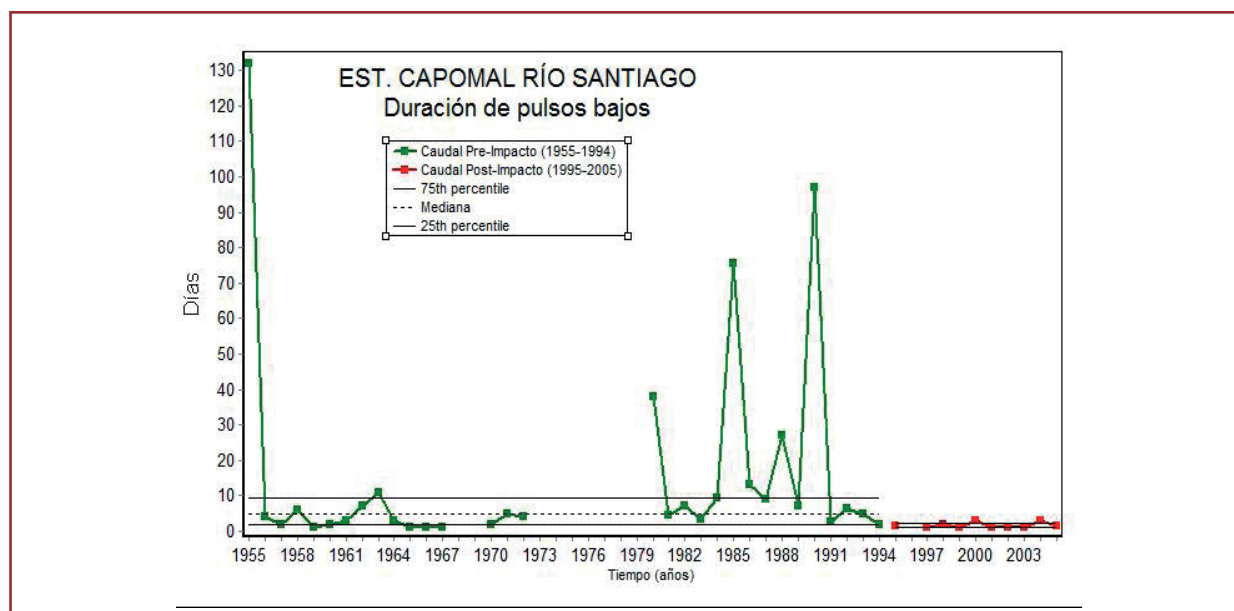


Figura 4.4.3.3.1. Duración de los pulsos de caudal bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

La Figura 4.4.3.3.2 muestra un aumento de dos días en la cantidad de los pulsos bajos anuales en el río, de cinco en el periodo de preimpacto y siete en el de posimpacto.

En la Figura 4.4.3.3.3 se observa la modificación en la fechas de aparición de los pulsos de caudal bajo. En el periodo de preimpacto, éste se encontraba alrededor del día 95 juliano (abril) y, para el periodo de posimpacto, alrededor del día 50 (mediados de febrero).

4.4.3.4. Caudales altos

La ausencia de caudales altos afecta el balance en el número de especies acuáticas y riparias; disminuye la creación de zonas propicias para la llegada, establecimiento y colonización de plantas; estatiza la forma del hábitat del canal y de la zona de inundación anulando la dinámica de los depósitos de grava y rocas en las áreas de ovoposición; aumenta la presencia de troncos y vegetación caída, y se acumula la materia

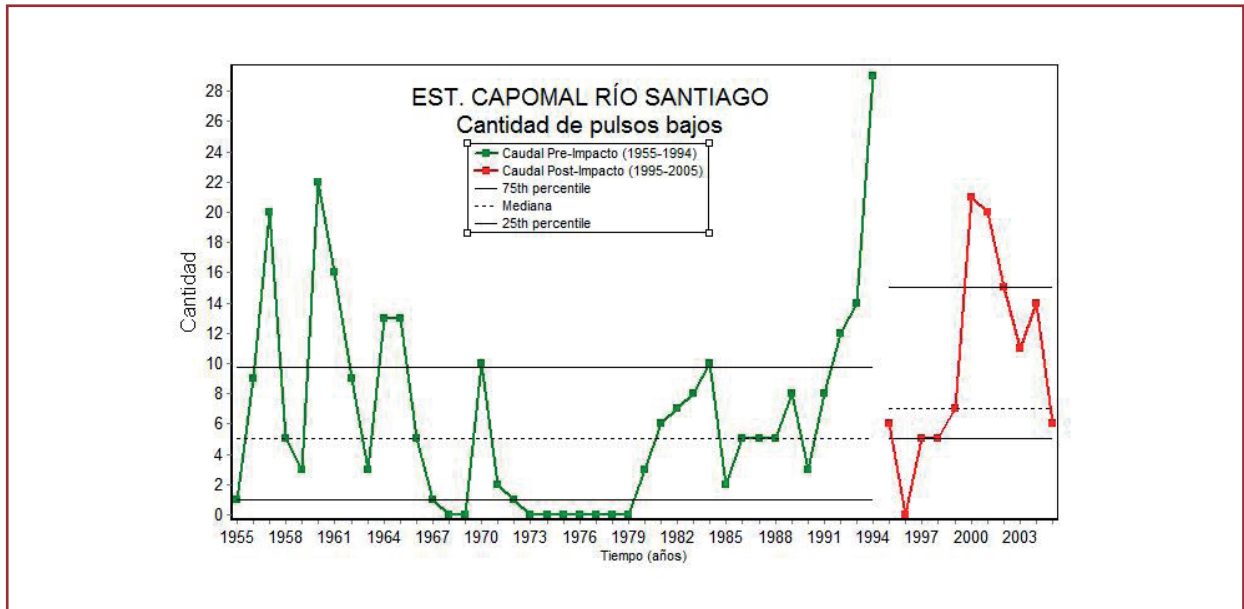


Figura 4.4.3.3.2. Duración de los pulsos de caudal bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

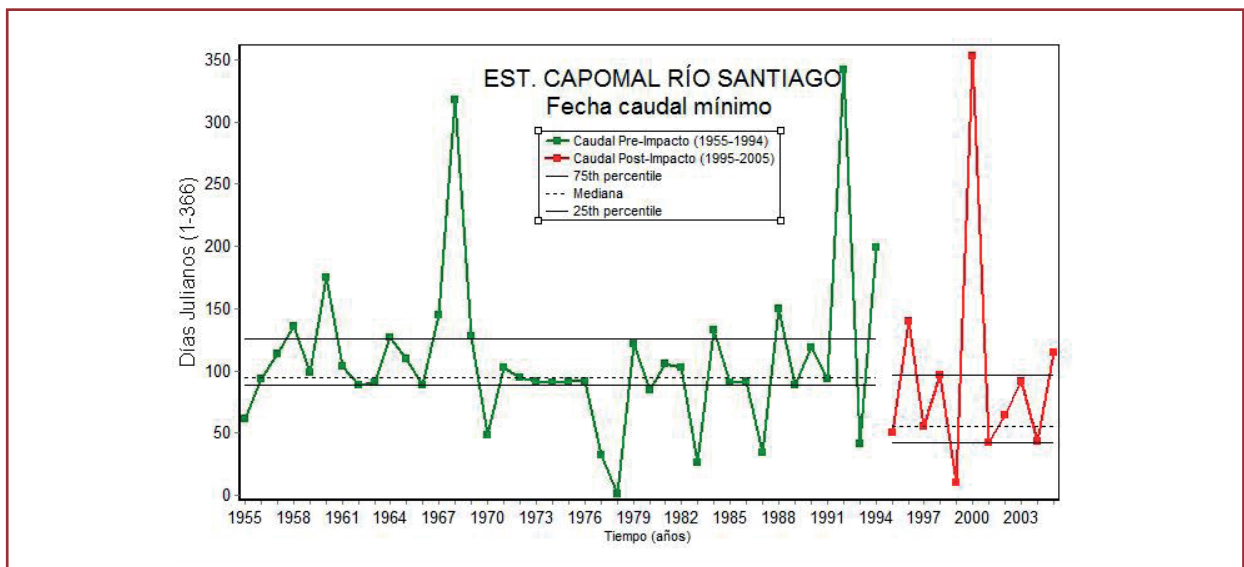


Figura 4.4.3.3.3. Momento de aparición de los pulsos de caudal bajos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

orgánica. La disminución de caudales altos propicia la invasión tanto de especies acuáticas introducidas al río, como de las comunidades riparias, vegetales y animales, al cauce. Se altera la distribución de semillas y frutos en los corredores fluviales, porque los caudales

altos prolongados favorecen la expansión lateral del río, lo que genera nuevos hábitats (canales secundarios, pequeños lagos o charcas). Además, disminuye la distribución de especies cuyas semillas requieren de un periodo prolongado de humedad para poder germinar.^{8, 10, 38, 55, 56, 57, 76, 95}

Las Figuras 4.4.3.4.1 a la 4.4.3.4.6 muestran el comportamiento de los caudales altos en el río Santiago. En la Figura 4.4.3.4.1 se observa la caída de la tasa de cambio.

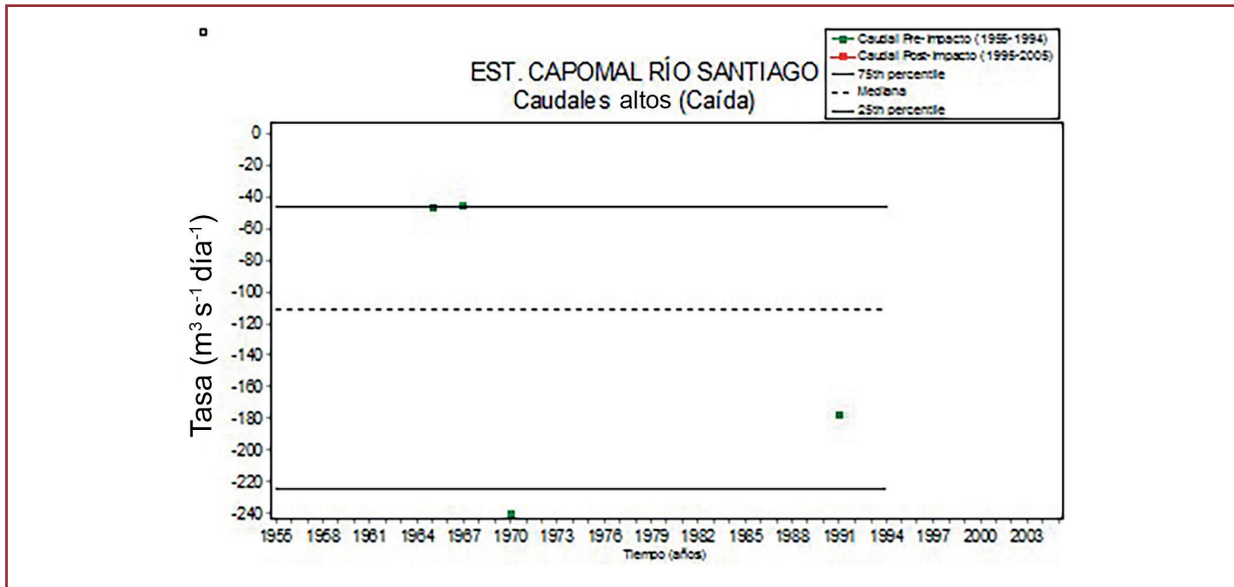


Figura 4.4.3.4.1. Tasa de cambio de los caudales altos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.4.2 se abate la duración de los caudales altos.

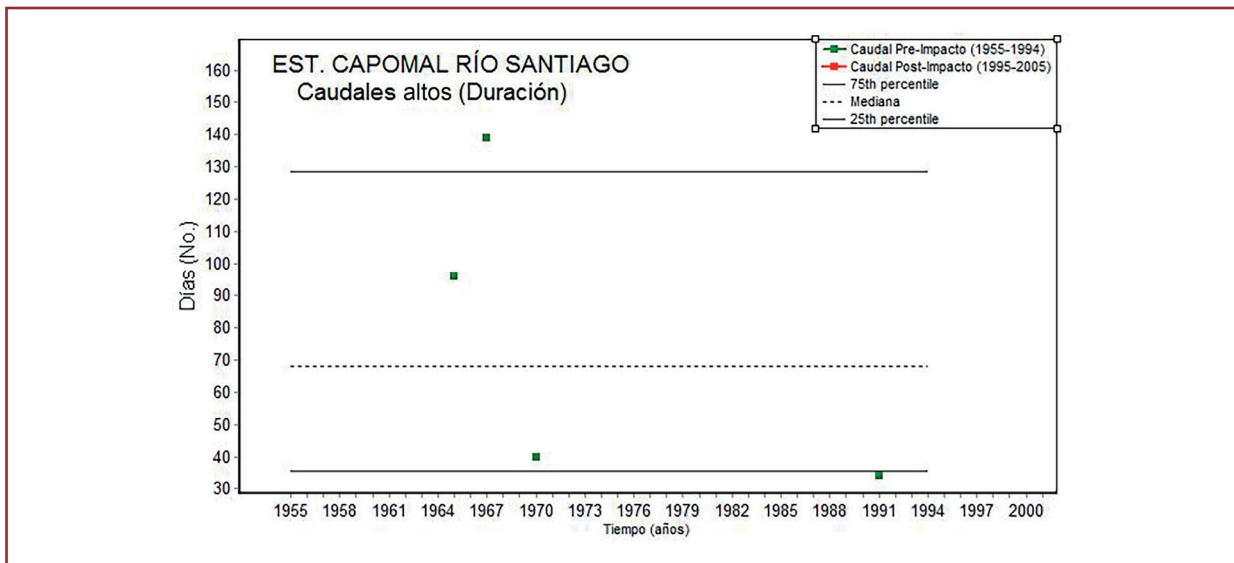


Figura 4.4.3.4.2. Duración de los caudales altos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.4.3 la frecuencia de los caudales altos en el periodo posimpacto señala un valor de cero.

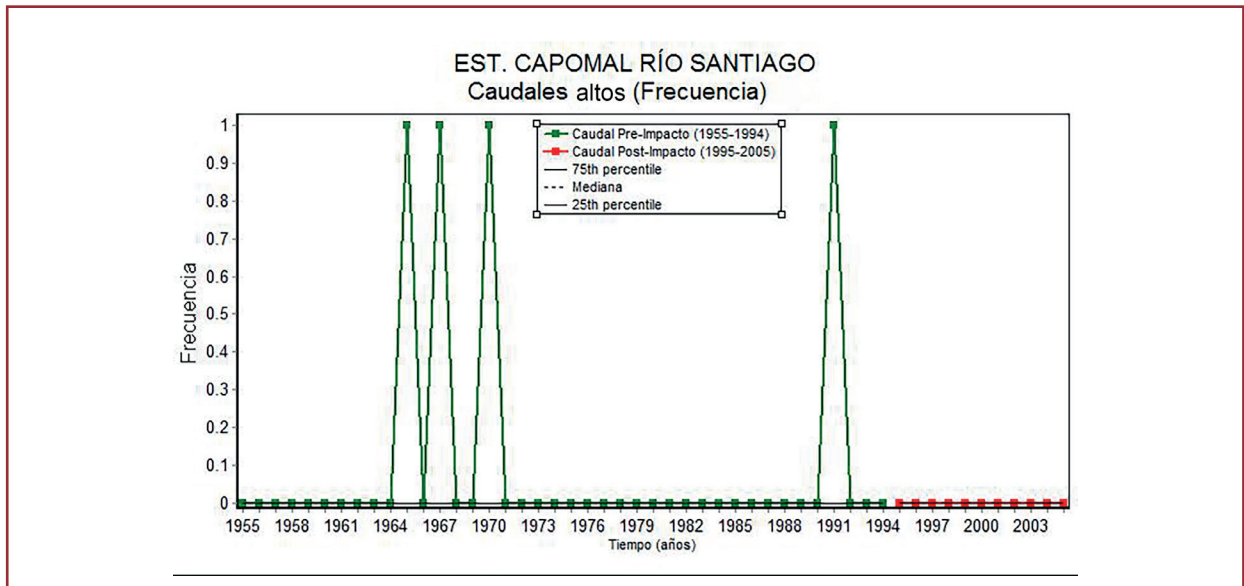


Figura 4.4.3.4.3. Frecuencia de los caudales altos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

La Figura 4.4.3.4.4 señala la desaparición de la periodicidad con la que se presentaban los caudales altos en el periodo preimpacto, respecto al periodo posimpacto.

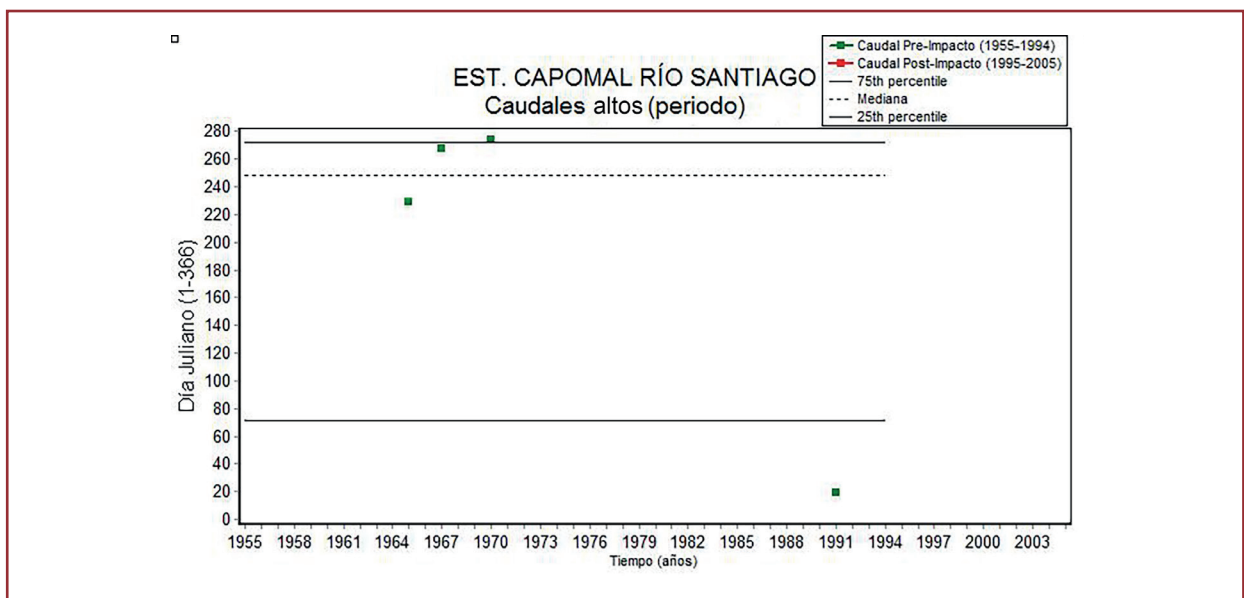


Figura 4.4.3.4.4. Periodicidad de los caudales altos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

La Figura 4.4.3.4.5 muestra que los picos de los caudales altos del periodo de preimpacto desaparecieron por completo en el de posimpacto.

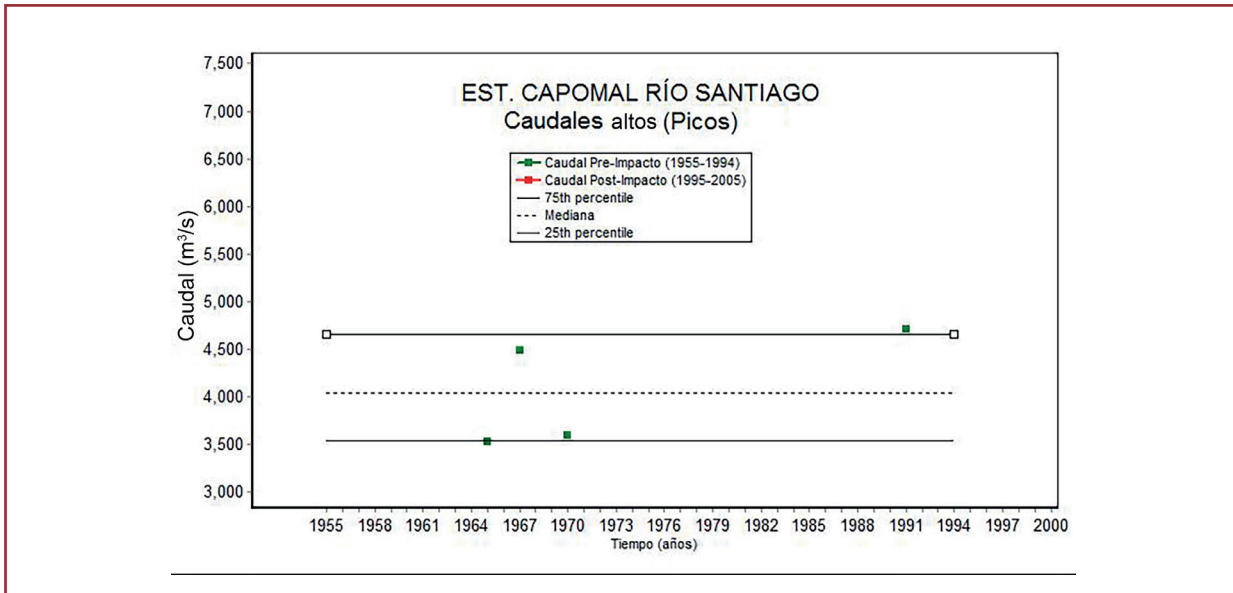


Figura 4.4.3.4.5. Picos de los caudales altos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

En la Figura 4.4.3.4.6 se observa la modificación total en la tasa de cambio de los caudales altos para los periodos de preimpacto y posimpacto.

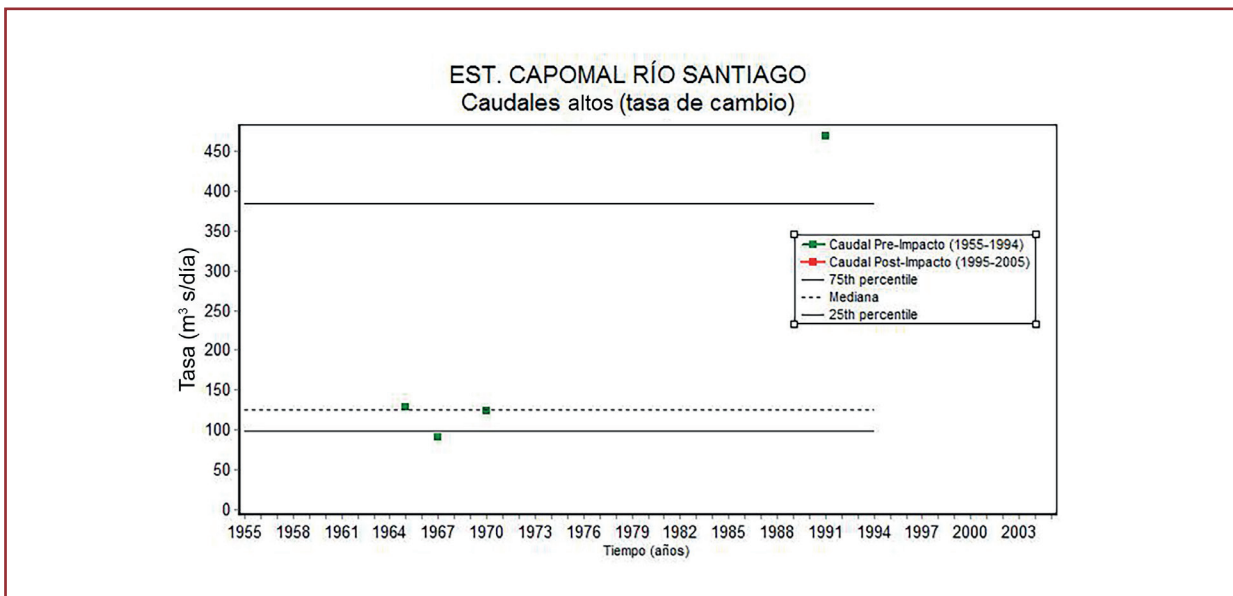


Figura 4.4.3.4.6. Tasa de cambio en los caudales altos, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

4.4.3.5. Número de caudales mínimos y máximos por día

La variación en la frecuencia de caudales máximos y mínimos que se presentan dentro de un cierto tiempo, genera estrés en las plantas debido a las modificaciones en las condiciones de humedad y duración de los periodos de anaerobiosis; en la disposición de alimento, tanto para las especies en el canal, como en el intercambio de nutrientes entre el río y las zonas de inundación, y en el acceso a los sitios de anidación, reproducción, alimentación y protección, por las perturbaciones del sustrato.^{8, 10, 38, 76, 95} El cambio en la frecuencia de caudales máximos y mínimos que se presentan cada 3, 7, 30 y 90 días se presenta en las Figuras 4.4.3.5.1 a la 4.4.3.5.9.

Las Figuras 4.4.3.5.1 y 4.4.3.5.2 muestran el caudal mínimo que se presenta por tres días,

cuyo promedio es de $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el periodo preimpacto, y de $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el periodo posimpacto, mientras que los caudales máximos por tres días varían de $1\ 500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el periodo preimpacto, a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el periodo posimpacto. Por lo tanto, existe un claro cambio en la magnitud de los caudales de cada tres días; a la alta en los mínimos y a la baja en los máximos. En ambos se abate la variación, lo que homogeniza los flujos.

En las Figuras 4.4.3.5.3 y 4.4.3.5.4 se observa la frecuencia de los caudales mínimos y máximos por siete días. En el periodo preimpacto el promedio mínimo se encuentra cercano a los $22.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y, en el periodo posimpacto, en los $35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Por su parte, el promedio máximo preimpacto es cercano a $1\ 250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y, el de posimpacto, a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Se observan los mismos cambios que en el caso de los caudales mínimos y máximos por tres días.

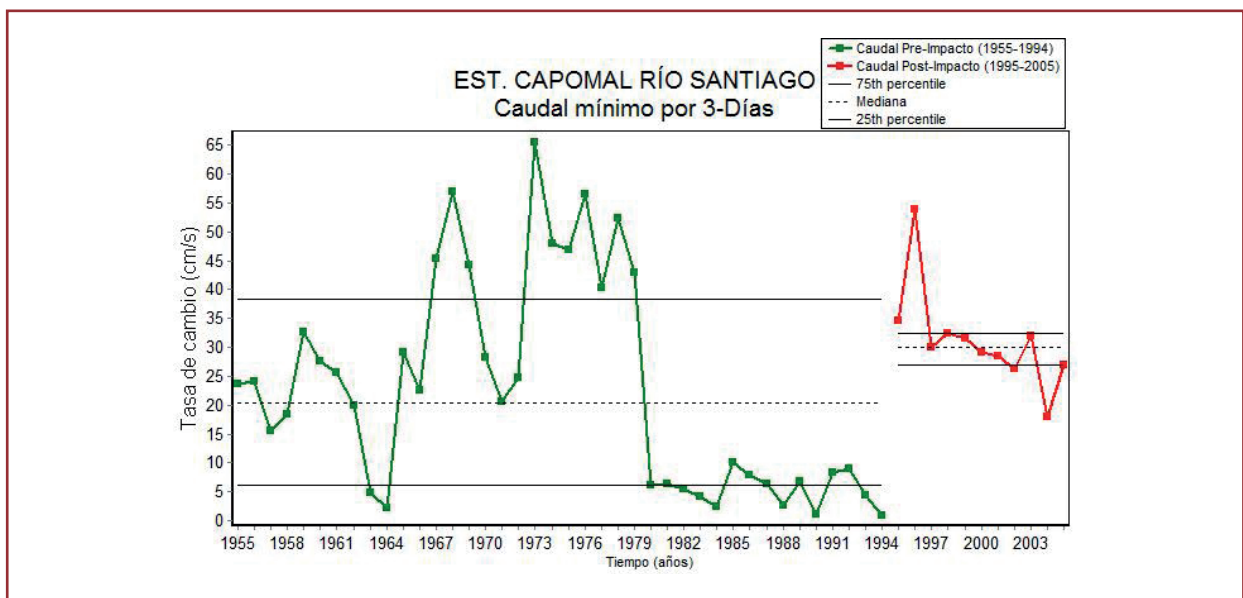


Figura 4.4.3.5.1. Caudales mínimos de tres días, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguilpa.

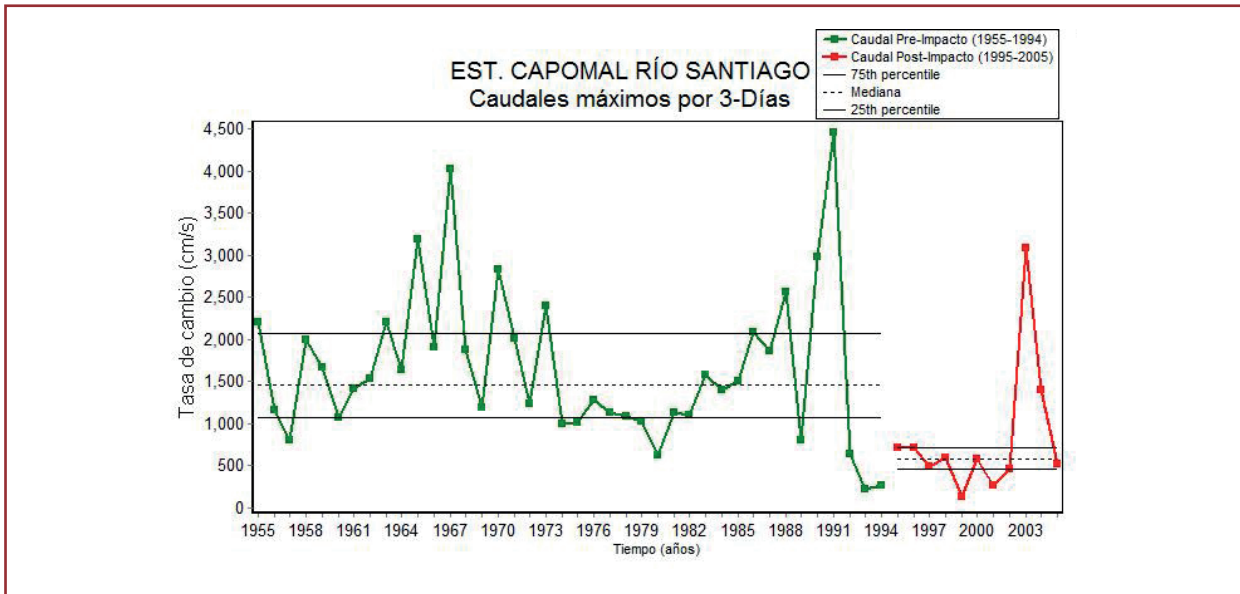


Figura 4.4.3.5.2. Caudales máximos de tres días, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

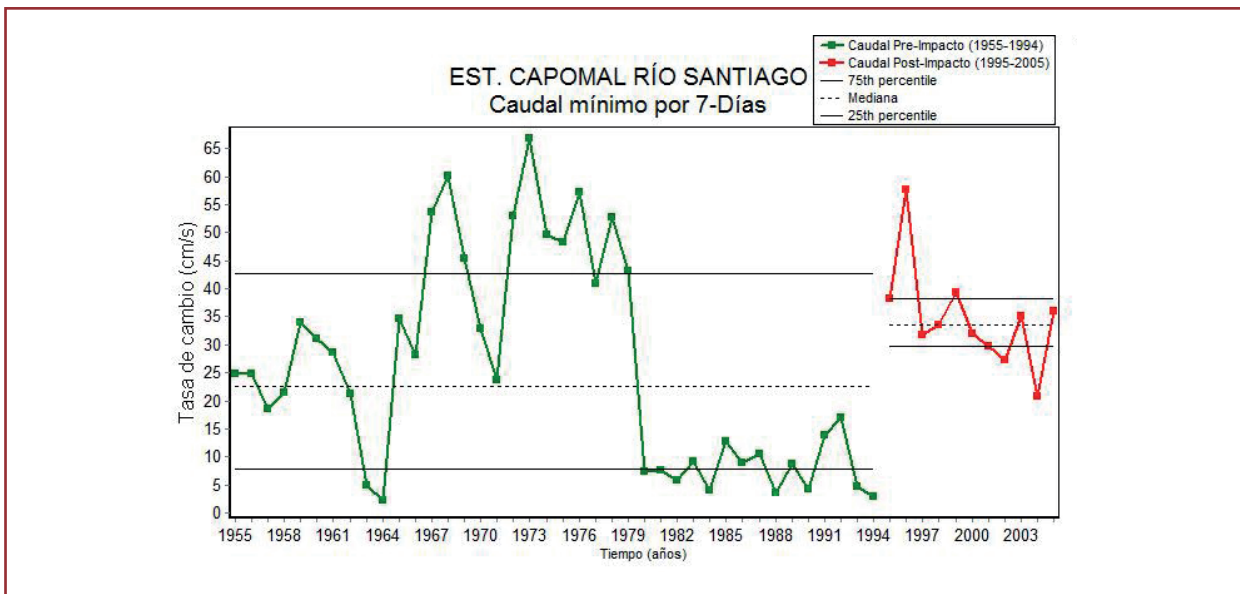


Figura 4.4.3.5.3. Caudales mínimos de siete días, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

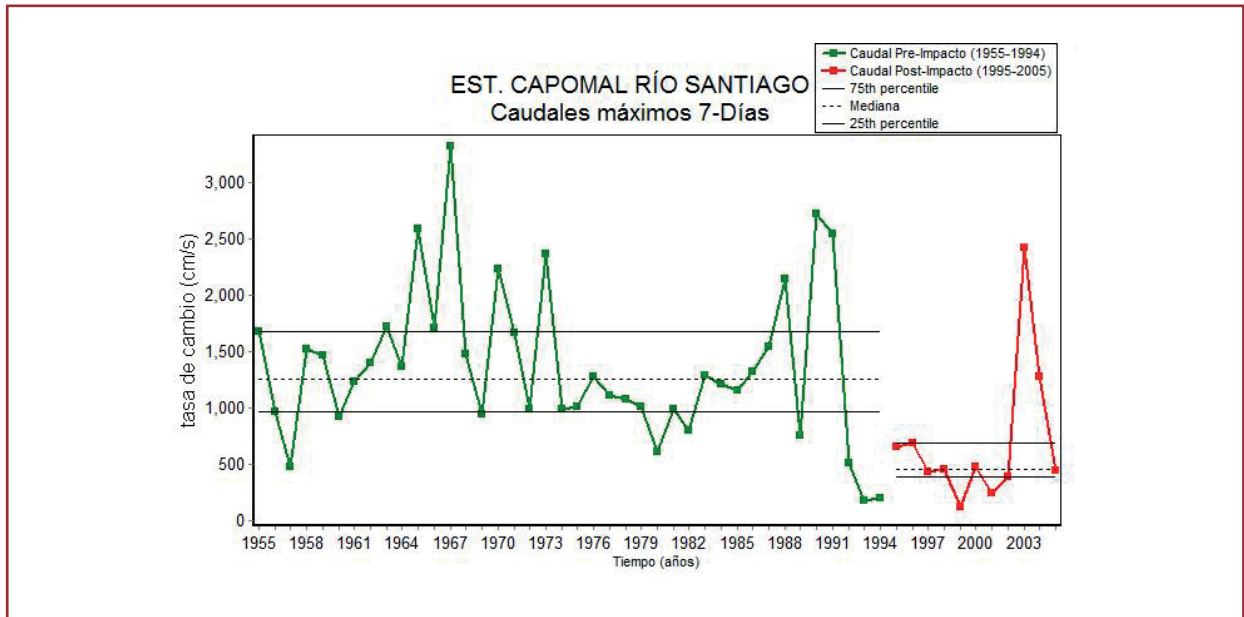


Figura 4.4.3.5.4. Caudales máximos de siete días, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) construcción de la presa Aguamilpa.

En las Figuras 4.4.3.5.5 a 4.4.3.5.6 puede observarse que los caudales máximos y mínimos para un lapso de noventa días muestran el mismo comportamiento que en los casos correspondientes a los tres y siete días, pero con cambios en los promedios. El mínimo preimpacto es de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y el posimpacto de $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mientras que el

máximo preimpacto es de $700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y el de posimpacto $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Debe resaltarse cómo los caudales mínimos aumentan y los máximos disminuyen progresivamente en los tres casos, de manera que el efecto de homogenización del caudal del río abajo de la presa va siendo más sensible conforme pasa el tiempo.

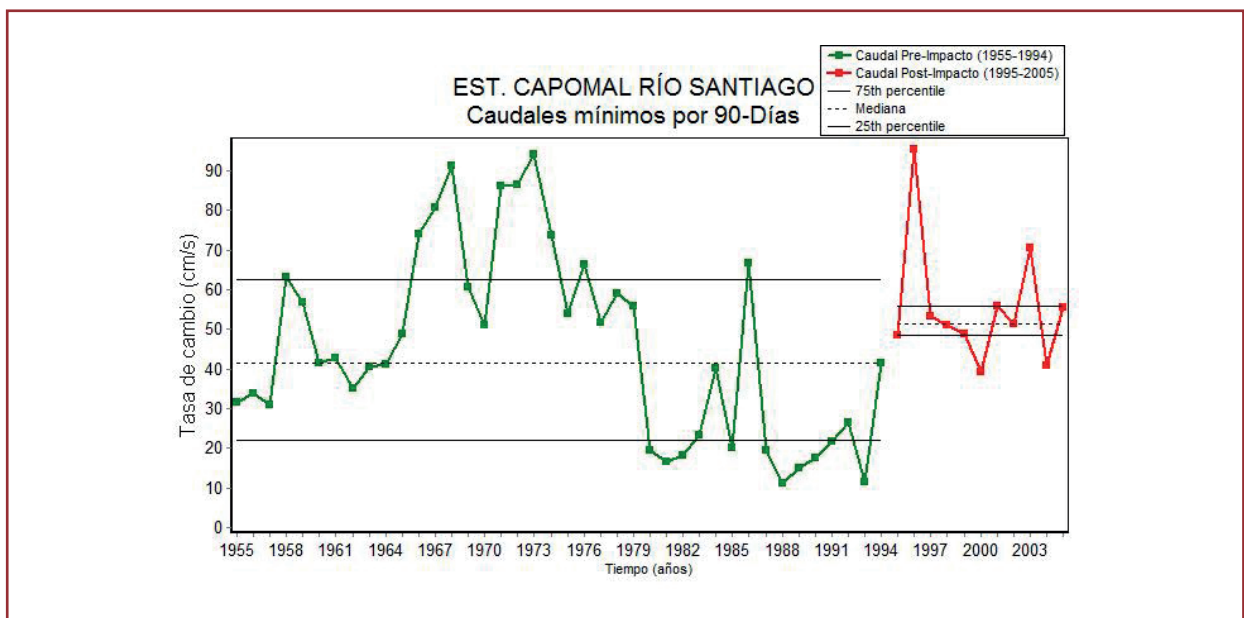


Figura 4.4.3.5.5. Caudales mínimos de noventa días, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

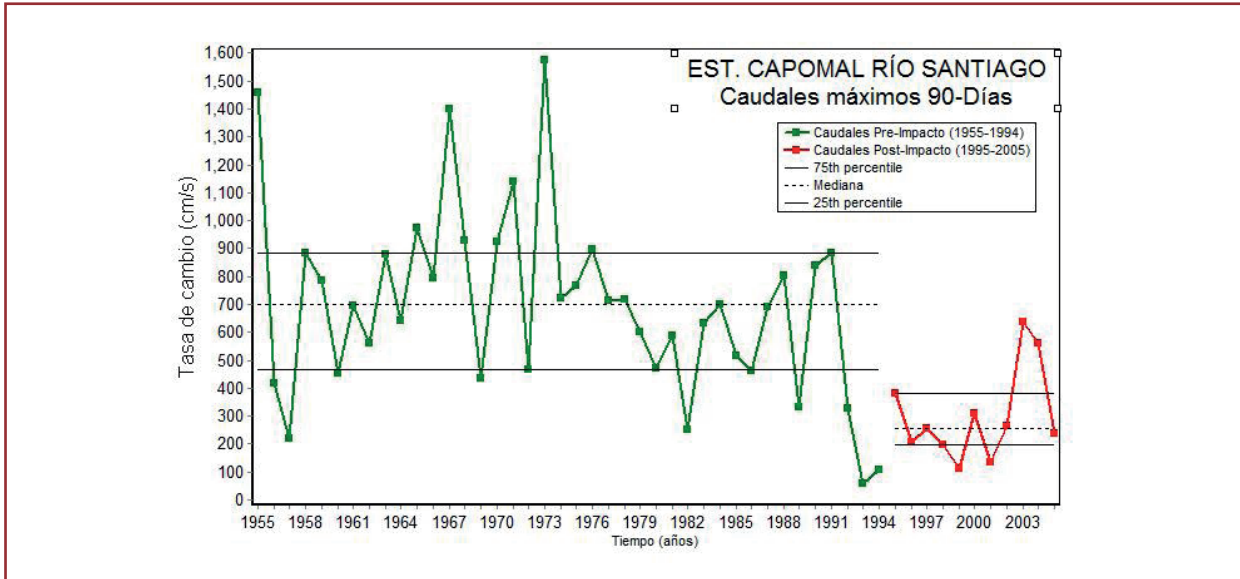


Figura 4.4.3.5.6. Caudales máximos de noventa días, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

4.4.3.6. Caída en la tasa de cambio, índice de caudal base y tasa de inversión

En la Figura 4.4.3.6.1 se observa que la tasa de cambio (cambio de velocidad en el flujo) disminuyó de $-5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $-8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, en

promedio. Esto es, el flujo posimpacto es más lento. En la Figura 4.4.3.6.2 se observa que el índice de caudal base aumentó de $0.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el periodo preimpacto, a $0.25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en posimpacto. Esto es, el río presenta un caudal base mayor.

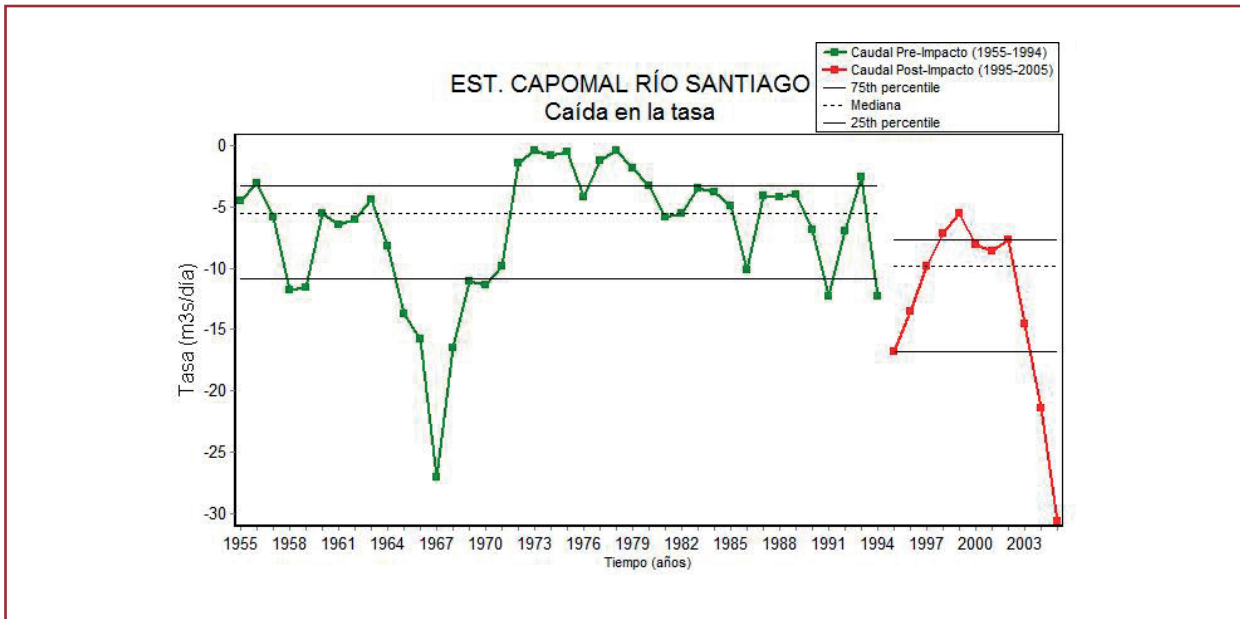


Figura 4.4.3.6.1. Comportamiento de la tasa de cambio, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

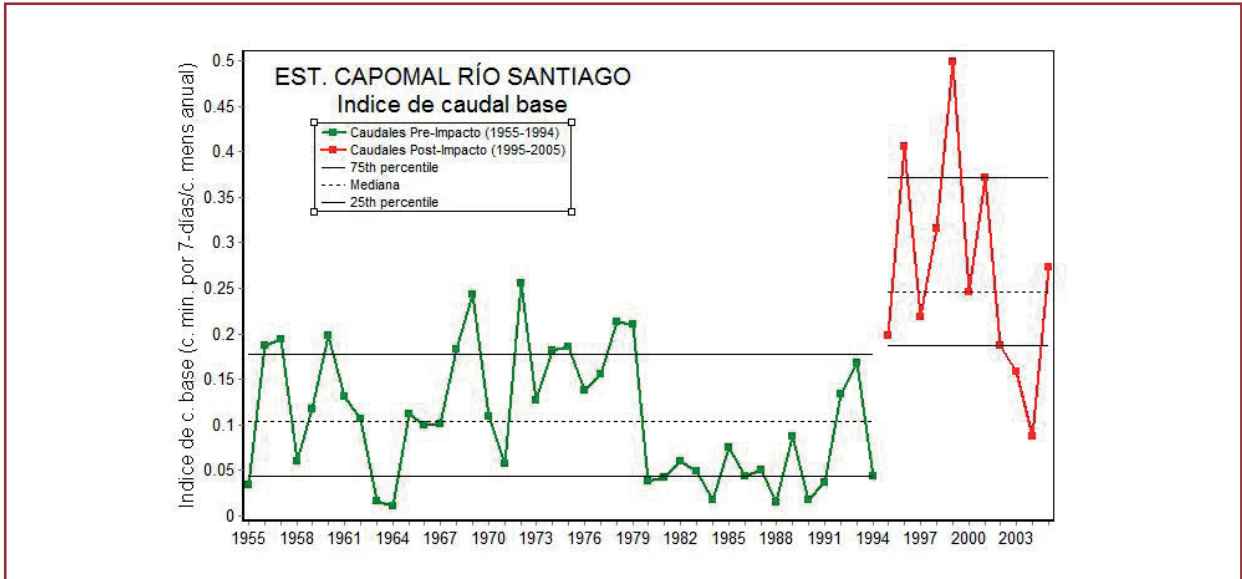


Figura 4.4.3.6.2. Comportamiento del índice de caudal base, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

La Figura 4.4.3.6.3 muestra el comportamiento de la inversión de los caudales. Los promedios no se modifican considerablemente entre los periodos pre y pos, pero sí se modificaron

los valores extremos. Así, los caudales bajos prácticamente se eliminaron, facilitando, o no limitando, la invasión y distribución de especies de plantas en el corredor fluvial.

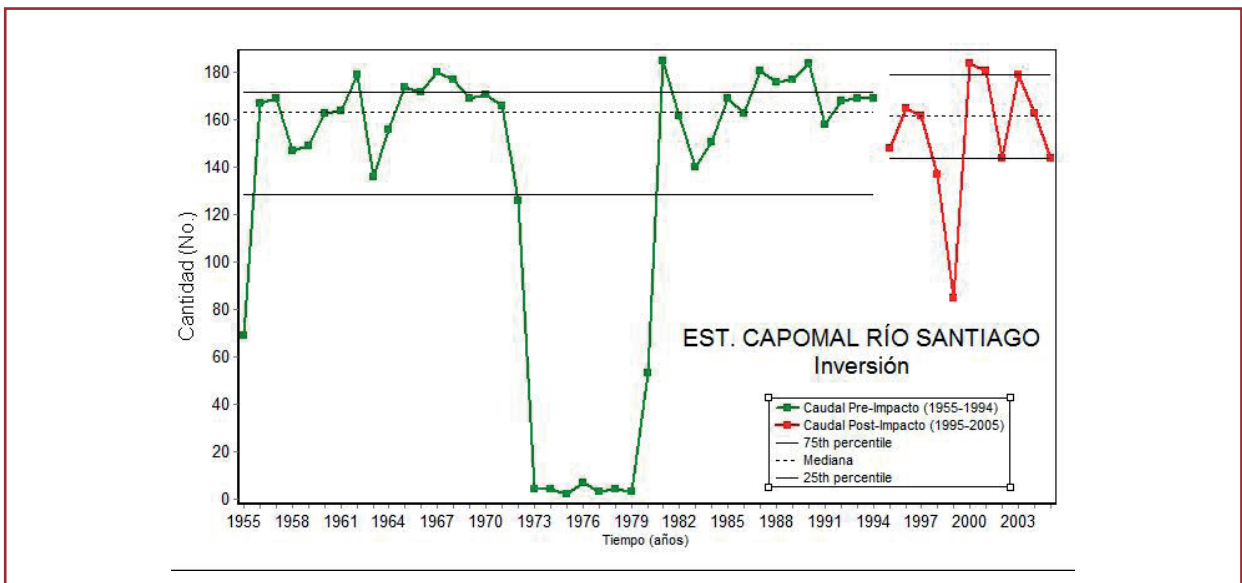


Figura 4.4.3.6.3. Comportamiento en la inversión de los caudales, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) construcción de la presa Aguamilpa.

4.4.3.7. Caudales mensuales

El análisis de los caudales mensuales para los periodos pre y post impacto confirman los resultados previos observados en la periodicidad, frecuencia, duración, magnitud y tasa de recambio. Se observa una modificación significativa en todo el año, particularmente en el decremento considerable

en los caudales para la época de secas (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo). Sin embargo, en mayo y junio se observa un incremento en los caudales bajos naturales (Figuras 4.4.3.7.1 a la 4.4.3.7.12, Anexo 4). Las Figuras 4.4.3.7.1 y 4.4.3.7.2 son ejemplos de la temporada de secas y pico de lluvias, respectivamente, para los caudales mensuales.

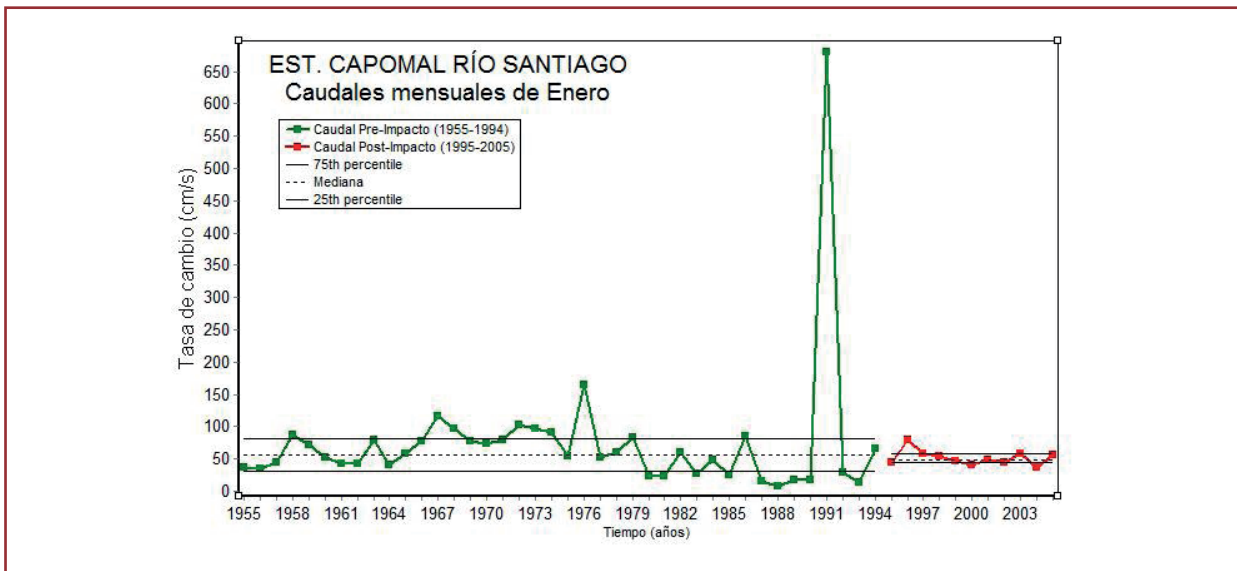


Figura 4.4.3.7.1. Caudales mensuales del mes de enero, pre (1955-1994) y pos (1995 - 2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

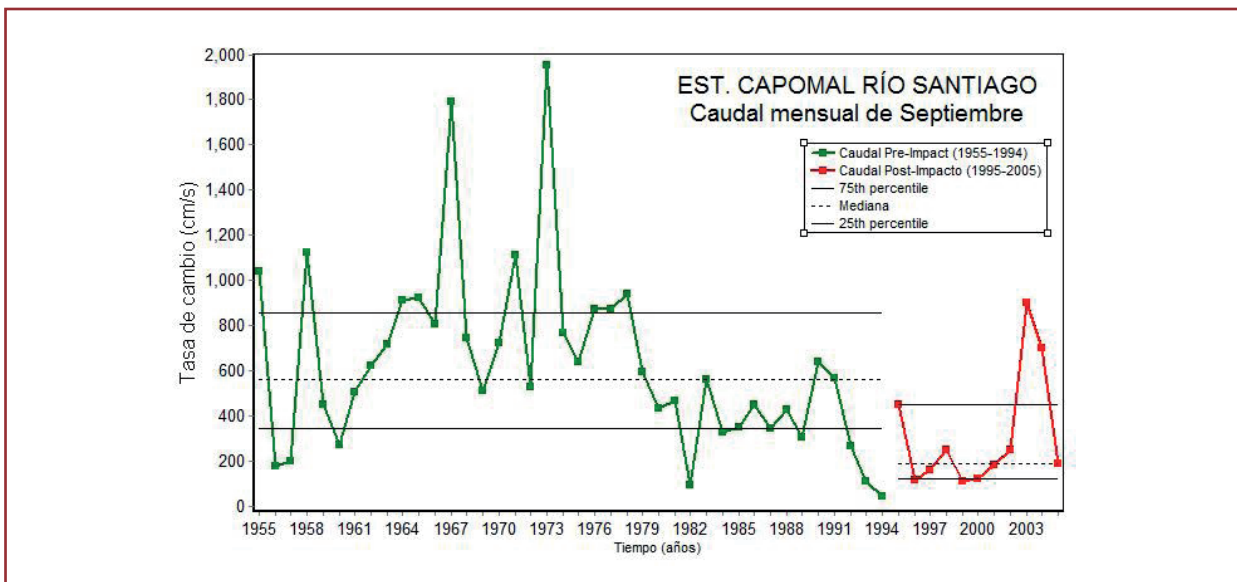


Figura 4.4.3.7.2. Caudales mensuales del mes de septiembre, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

4.4.3.8. Componentes del caudal ambiental

Los componentes del caudal ambiental para el río Santiago en el periodo comprendido desde 1955 hasta 2005, se observan en la Figura 4.4.3.8.1. Incluye los caudales extremos bajos (rojo),

los caudales bajos (verde fuerte), los pulsos de caudal altos (azul), así como las pequeñas (verde claro) y grandes inundaciones (naranja). En el periodo posimpacto se han perdido los caudales extremos bajos, los pulsos de caudal altos y las pequeñas inundaciones.

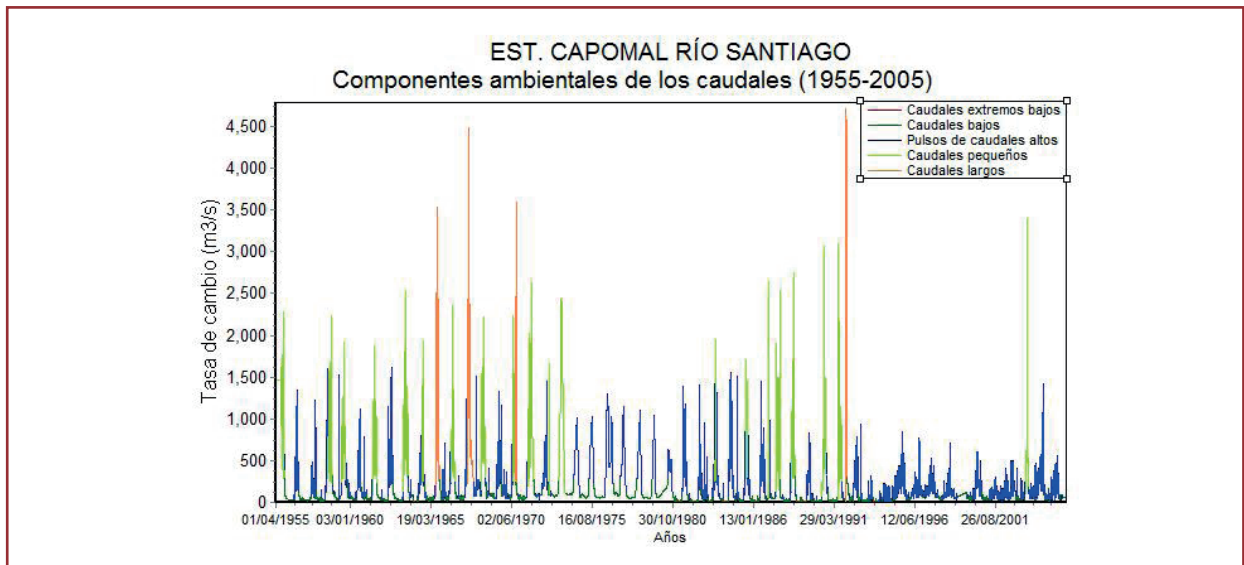
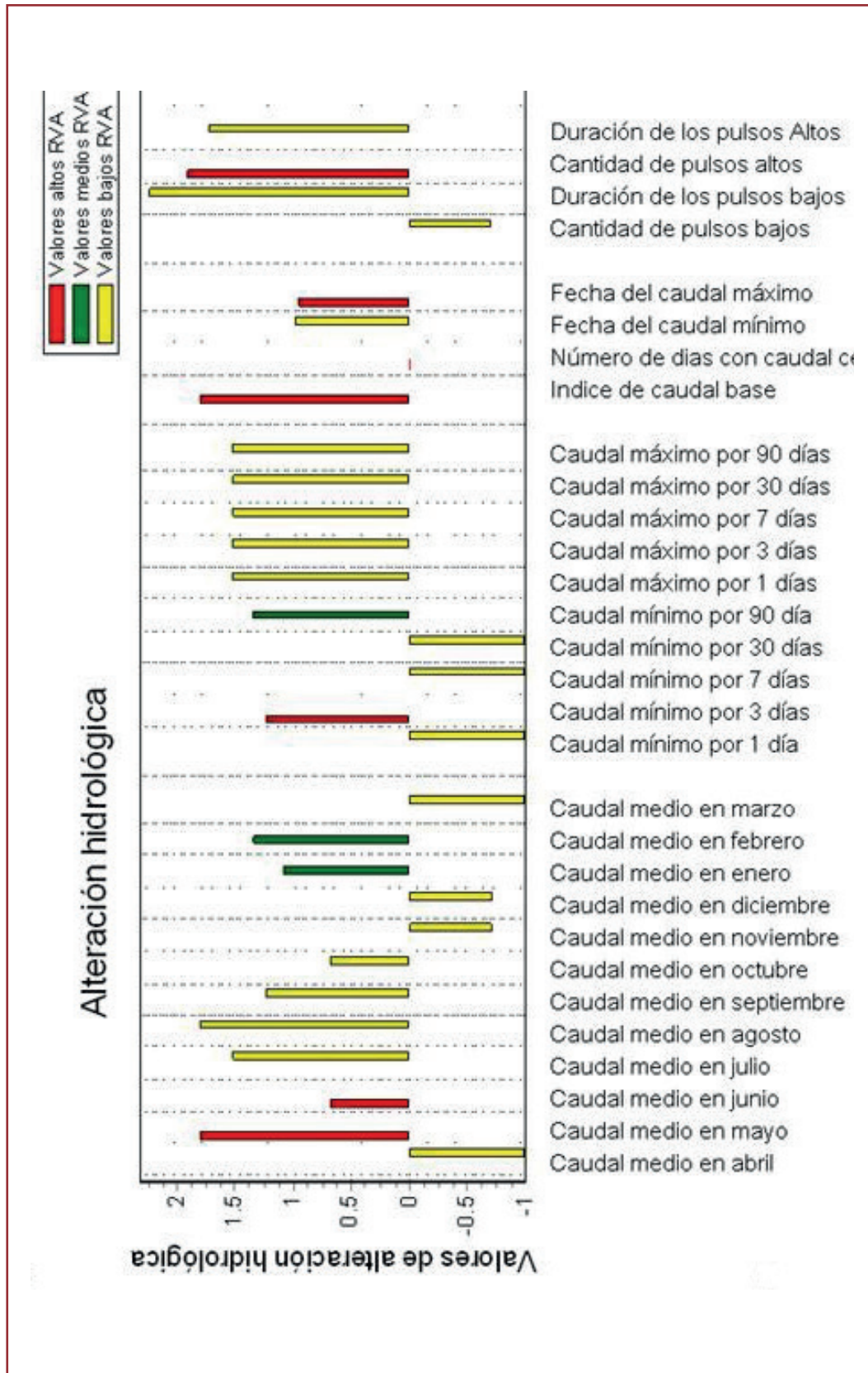


Figura 4.4.3.8.1. Componentes del caudal ambiental, pre (1955-1994) y pos (1995-2005) de la construcción de la presa Aguamilpa.

La alteración hidrológica del río Santiago se puede cuantificar a través de los rangos de variabilidad aproximada (RVA), que definen la magnitud de la alteración de los regímenes de caudales entre los eventos previos y posteriores a la modificación. En la Figura 4.4.3.8.2 se observan los valores que señalan una alteración hidrológica alta (rojo), una alteración media (verde) y una alteración baja (amarillo). Estos rangos pueden utilizarse para establecer las metas y objetivos del caudal ambiental para el río.

Los RVA más altos se observaron en los caudales medios del mes de mayo y junio: en los caudales mínimos de tres días, en el índice de caudales base, en la fecha de caudal máximo, en la cantidad de pulsos altos y en la tasa de variación de los caudales. Los valores más bajos se observaron en: el caudal medio de enero y febrero, así como en el caudal mínimo de noventa días. Con esta información se establecerán las estrategias para el manejo de la presa Aguamilpa.

Figura 4.4.3.8.2. Rangos de variabilidad aproximada para algunos de los parámetros de alteración hidrológica en los caudales del río Santiago, Nayarit.



4.4.3.9. Caudales medios para los periodos pre y pos impacto

El comportamiento de los caudales medios mensuales pre (verde) y posimpacto (rojo) se observa en la Figura 4.4.3.9.1. Estos caudales medios señalan una alteración significativa para los caudales altos en los

meses de julio, agosto, septiembre y octubre. En cambio, abril, mayo y junio señalan una alteración significativa inversa al aumentar los caudales bajos. Por lo tanto, las estrategias para el manejo de la presa pueden efectuarse analizando principalmente las tres últimas graficas (Figuras 4.4.3.8.1, 4.4.3.8.2 y 4.4.3.9.1).

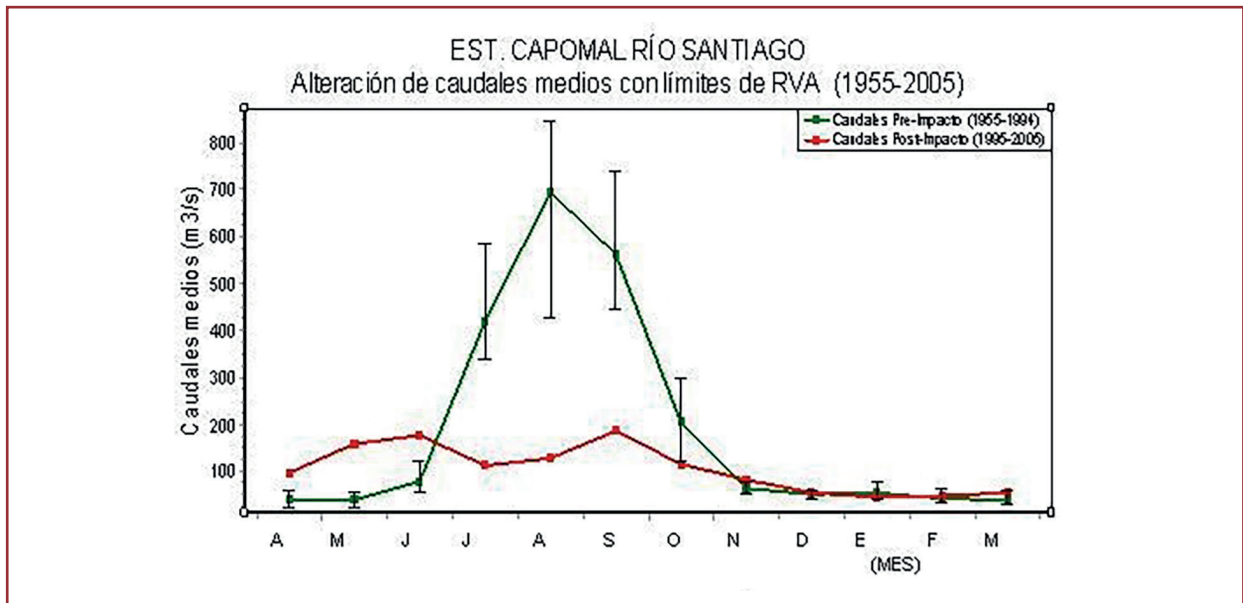


Figura 4.4.3.9. 1. Comportamiento de los caudales medios mensuales para los periodos de pre y posimpacto.

4.4.3.10. Análisis de regresión y correlación de los parámetros IHA, los componentes ambientales y caudales ambientales en el río Verde

Los análisis de regresión y correlación lineal de los caudales mensuales en el periodo 1955 a 2005, se muestran en la Figura 4.4.3.10.1 a la 4.4.3.10.12 (Anexo 5). Presentan una caída significativa durante las lluvias, con 14.7% en octubre y 29.2% en agosto, debido a un decremento en los caudales altos. Al contrario, para enero y marzo (estío) se

observa un incremento en la descarga de la presa que propicia la pérdida de los caudales extremos bajos naturales en estiaje (noviembre-mayo), con una variabilidad que va de 1.1% en mayo a 10.1% en noviembre. Asimismo, la frecuencia de caudales bajos presenta una tendencia negativa en el tiempo, de 13.72 a 26.65% para los mismos meses (estío: Tabla 4.4.3.10.1). Las Figuras 4.4.3.10.1 (enero) y 4.4.3.10.2 (agosto), estío y lluvias, respectivamente, ejemplifican la variación mensual de caudales (correlación y regresión lineal) durante el periodo de estudio.

Tabla 4.4.3.10.1. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales mensuales y caudales bajos en el periodo de estudio (1955 - 2005).

MES	CAUDALES MENSUALES EC. DE REGRESIÓN	R ²	CAUDLAES BAJOS EC. REGRESIÓN	R ²
ABRIL	$Y = - 2.444 X + 4931$	0.034	$Y = 0.573 X - 1069$	0.0480
MAYO	$Y = - 1.388 X + 2847$	0.011	$Y = 1.241 X - 2385$	0.1734
JUNIO	$Y = - 03.077 X + 6247$	0.056	$Y = 0.047 X + 11.14$	0.0000
JULIO	$Y = - 9.828 X + 1991$	0.237	$Y = -1.967 X + 4067$	0.2662
AGOSTO	$Y = - 14.32 X + 2896$	0.292	$Y = -2.246 X + 4634$	0.3577
SEPTIEMBRE	$Y = - 12.96 X + 263$	0.187	$Y = - 1.607 X + 3364$	0.2487
OCTUBRE	$Y = - 7.195 X + 146$	0.147	$Y = - 1.204 X + 2519$	0.1383
NOVIEMBRE	$Y = - 4.858 X + 977$	0.101	$Y = - 0.1504 X + 381$	0.0030
DICIEMBRE	$Y = - 3.953 X + 794$	0.079	$Y = - 0.430 X + 919.1$	0.4190
ENERO	$Y = - 2.127 X + 433$	0.016	$Y = - 0.2308 X + 523.6$	0.0150
FEBRERO	$Y = - 3.048 X + 612$	0.053	$Y = 0.0061 X + 71.79$	Ex- ⁶ 8.01
MARZO	$Y = - 3.044 X + 604$	0.052	$Y = 0.1266X + 188.7$	0.0030

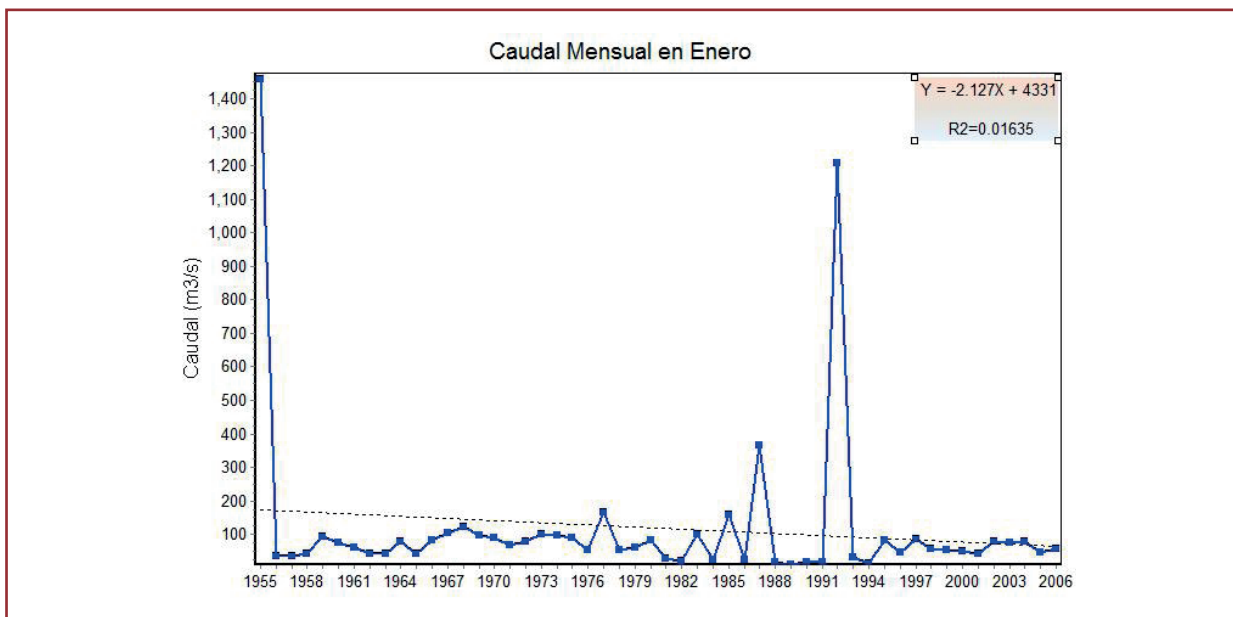


Figura 4.4.3.10.1. Análisis de regresión y correlación lineal del caudal medio mensual para el mes de enero en el periodo de estudio (1955-2005).

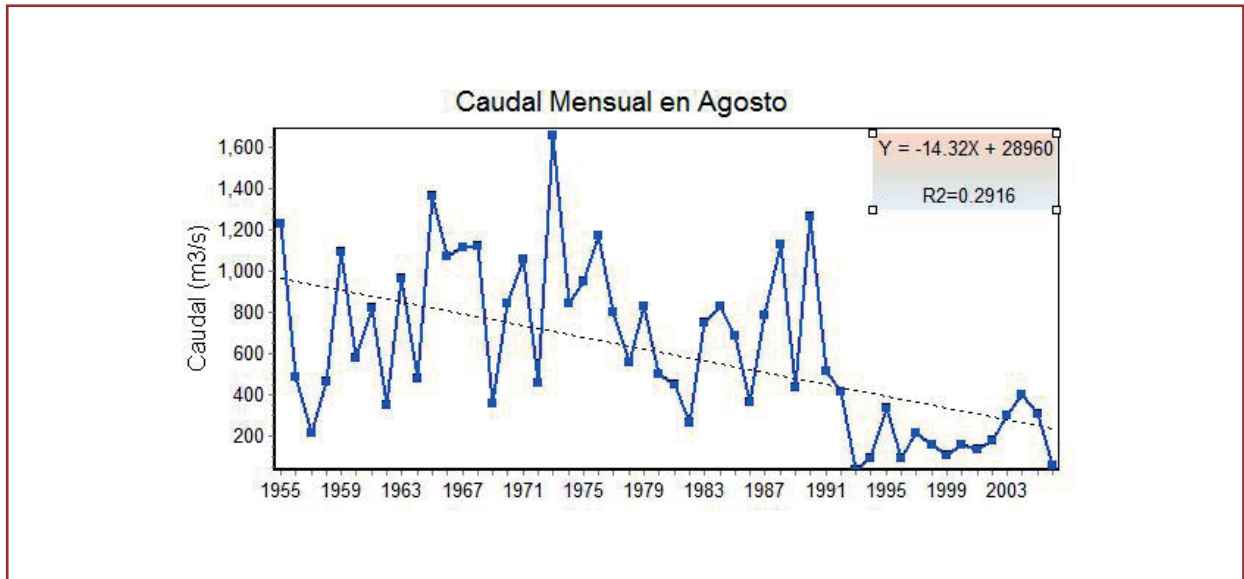


Figura 4.4.3.10.2. Análisis de regresión y correlación lineal del caudal medio mensual para el mes de agosto (1955-2005).

Las Figuras 4.4.3.10.13 a la 4.4.3.10.24 (Anexo 6) muestran los análisis de regresión y correlación para los caudales bajos en el año. Las Figuras 4.4.3.10.3 (mayo) y 4.4.3.10.4 (julio) representan las épocas de secas y de lluvias, y

presentan los mayores coeficientes de correlación lineal y variación. En mayo (estío) se observa que los caudales bajos han crecido un 17.34%, mientras que en julio (lluvias) se han abatido un 26.62%, modificando los caudales naturales.

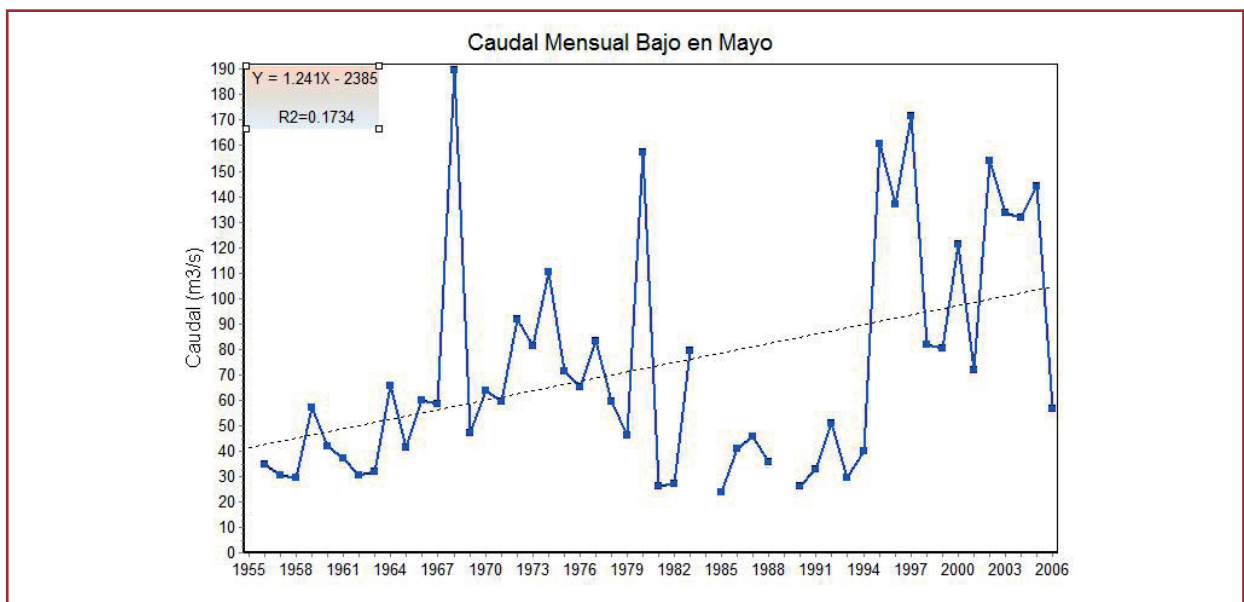


Figura 4.4.3.10.3. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos durante el mes de mayo (1955-2005).

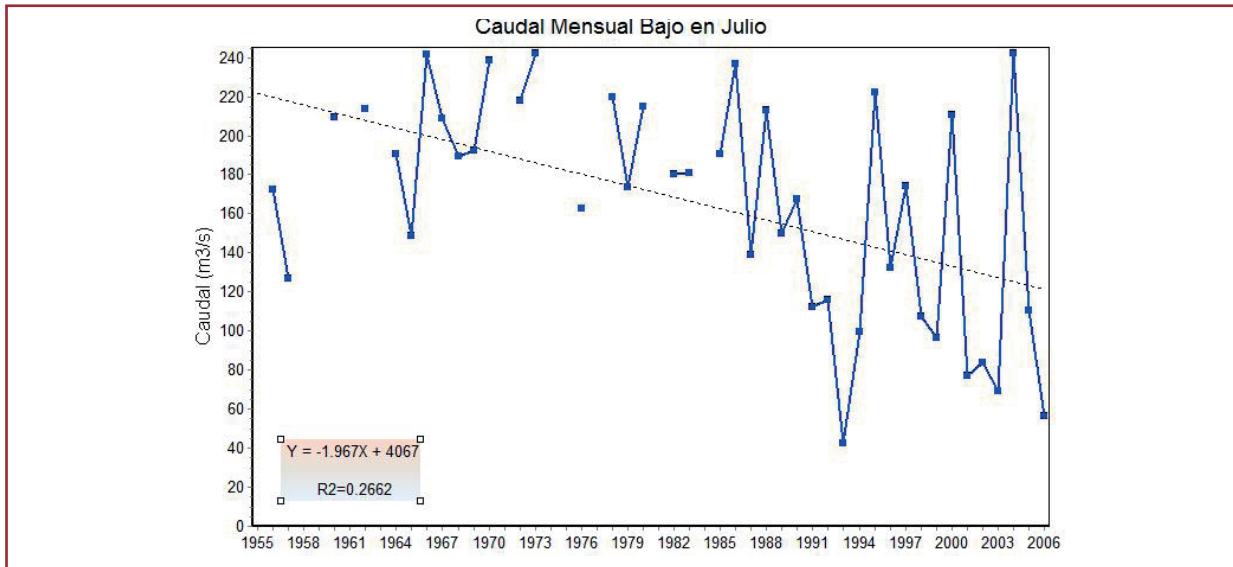


Figura 4.4.3.10.4. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos para el mes de julio (1955–2005).

Los componentes del caudal ambiental que muestran variaciones significativas fueron: la frecuencia de los caudales extremos bajos, con una R^2 de -243.7, o un decremento de 2437%; la frecuencia de los pulsos de caudal alto, con una R^2 de 0.338, o un incremento del 33.8% en su variación; la duración de las grandes

inundaciones, con una R^2 de 0.264 o un incremento del 26.4% de variación; el periodo de las grandes inundaciones, con una R^2 de 0.114, o un incremento de 11.43% de variación. Estos resultados representan la modificación en los caudales naturales por el manejo de la presa (Tabla 4.4.3.10.2).

Tabla 4.4.3.10.2. Análisis de regresión y correlación lineal de los componentes del caudal ambiental en el río Santiago.

	C. EXTREMOS BAJOS	R^2	CAUDALES ALTOS	R^2	CAUDALES PEQUEÑOS	R^2	GRANDES INUNDACIONES	R^2
PICOS	$Y = -0.001X + 14.47$	$E 3.7 \cdot 10^{-5}$	$Y = -5.15X + 106$	0.066	$Y = 3.091X - 4047$	0.006	$Y = -1.31X + 6536$	0.001
DURACIÓN	$Y = -0.157X + 319.7$	0.038	$Y = -0.38X + 782$	0.017	$Y = -0.53X + 1124$	0.027	$Y = -1.34X + 2729$	0.264
PERIODO	$Y = -0.405X + 910.1$	0.021	$Y = 0.82X - 1387$	0.025	$Y = 0.398X - 551.4$	0.009	$Y = -2.18X + 4526$	0.114
FRECUENCIA	$Y = 0.125X - 243.7$	-243.7	$Y = 0.38X - 737$	0.338	$Y = -0.016X + 21.5$	0.056	$Y = -0.004X + 0.8$	$E 3 \cdot 10^{-4}$
TASA CAMB.			$Y = -0.22X + 495$	0.010	$Y = 1.304X - 2452$	0.011	$Y = 3.057X - 5872$	0.01
CAÍDA			$Y = -0.36X + 669$	0.132	$Y = 0.279X - 630.6$	0.005	$Y = -0.88 + 1637$	0.032

Los otros componentes de variación del caudal que presentaron ligeras variaciones en el régimen natural fueron para la cantidad de pulsos altos (18.37%), para la tasa de cambio en el

caudal (5.8%), para la fecha en que se da el caudal mínimo de caudal durante el año (4.4%) y para la cantidad de pulsos bajos durante el año con un 4.4% (Tabla 4.4.3.10.3).

Tabla 4.4.3.10.3 . Parámetros importantes de la alteración hidrológica en el régimen de caudales.

COMPONENTE	EC. DE REGRESIÓN	R ²
CAUDALES BASE	$Y = 0.002X - 4.356$	0.101
FECHA DEL CAUDAL MÍNIMO	$Y = - 0.903X + 2024$	0.044
CANTIDAD DE PULSOS BAJOS	$Y = 0.101 X - 192.3$	0.044
DURACIÓN DE PULSOS BAJOS	$Y = - 0.250 X + 514.6$	0.020
CANTIDAD DE PULSOS ALTOS	$Y = - 0.087 X + 175.9$	0.1837
DURACIÓN DE PULSOS ALTOS	$Y = - 0.1404 X + 294$	0.007
TASA DE CAMBIO	$Y = - 0.442 X + 918.3$	0.058
CAÍDA EN LA TASA DE CAMBIO	$Y = 0.287 X - 603$	0.041
REVERSIONES	$Y = 0.516 X - 885.3$	0.017

4.4.4 DISCUSIÓN

La Tabla 4.4.4.1 presenta la propuesta de manejo para la presa Aguamilpa. Se obtuvo con el *software IHA (Indicators of Hydrologic Alteration)*, que permite calcular las características de los regímenes hidrológicos naturales y alterados. La conservación requiere un caudal de 25.49 m³s⁻¹ por 15 días durante

la sequía máxima (caudales extremos bajos de abril a mayo). Para todo el estiaje (noviembre a mayo) requiere caudales bajos de 40 m³s⁻¹, y para los meses de lluvias (julio-septiembre), un caudal de 697 m³s⁻¹. Para este mismo periodo, un caudal de 1 275.0 m³s⁻¹ durante cinco días con, al menos, dos años de retorno. Y un caudal de 3 500 m³s⁻¹ durante tres días, para periodos de retorno de, al menos, diez años.

Tabla 4.4.4.1. Propuesta de caudales ecológicos para el manejo de la presa Aguamilpa.

Componentes del caudal ambiental	Caudal m ³ /s	Representación estadística
Caudales extremos bajos (durante cinco días)	25.49	Caudales menores al 10% de todos los caudales bajos durante el periodo
Caudales bajos (marzo-mayo)	40.00	Periodo de regulación
Pulsos de caudal altos	295.1	5 en el mes de lluvias (agosto)
Caudales altos (julio-septiembre)	697.00	50% de los flujos para el periodo. Se incrementa 25% por día y termine cuando disminuya 10%
Pequeñas inundaciones (al menos de dos años de retorno durante cinco días)	1 275.00	Periodo de retorno al menos de dos años durante cinco días.
Grandes inundaciones (al menos de diez años de retorno)	3 500.00	Periodo de retorno al menos diez años durante tres días.

Escenarios:

- Los caudales extremos bajos de $25.49 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante la época de estiaje extremo, o para 15 días del mes de abril (Tabla 4.4.4.1), permitirán mantener el balance competitivo entre las especies riparias y las tolerantes al estrés. Asimismo, se generarán sitios para la colonización de plantas. Se establecerá la compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos, generándose las señales para la migración y desove de los peces.^{56, 57, 64, 74, 95}
 - Los caudales bajos de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante el estío (noviembre a mayo) proporcionarán hábitats para los organismos acuáticos. Mantendrán la suficiente humedad para las plantas. Habrá disposición de agua para los organismos terrestres, así como de alimento para los animales. Se generarán espacios para el anidamiento de especies de predadores. Se mantendrán los niveles de agua, oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua.^{56, 57, 64, 74, 95}
 - Los caudales altos de $697 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en lluvias (septiembre), simulando al hidropereodo (50% del caudal con incrementos del 25% por dos días hasta que termine el periodo. Posteriormente, se va disminuyendo hasta alcanzar el 10% del caudal). Este régimen propicia la dispersión de todas las especies hacia las charcas, humedales y planicie de inundación. Libera de desechos los canales y las zonas de desove y propicia el aireamiento de los sedimentos. Incrementa el acceso a los hábitats específicos para la reproducción, crianza y refugio contra los depredadores. Genera espacios para el desove y la migración, y las condiciones para cubrir las estrategias de las historias de vida de cada especie con sus mecanismos de comportamiento específicos, así como las condiciones para el intercambio de materia orgánica entre el río y la planicie de inundación. Se tiene mayor disponibilidad de minerales y de calidad del agua. Estos flujos mantendrán los niveles de humedad del suelo en los hábitats de flora y fauna en los canales anexos, y generarán las condiciones para la distribución adecuada de las semillas. Se movilizarán la arena y las partículas finas. Se mantendrán saludables la recarga de acuíferos y el balance sal/agua en los estuarios.^{56, 57, 64, 71, 74, 95}
 - Pulsos de caudal alto al inicio de la temporada de lluvias (junio) de $295 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, para la recuperación del sistema después de la época de secas, y mantener el balance de agua dulce y salada en los deltas del río.^{57, 64, 71, 74, 95}
 - Pequeñas inundaciones de $1\,275 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante el periodo de lluvias máximas (septiembre), con un periodo de retorno de dos años para inundar y preservar la ribera y mantener el balance de agua dulce/salada en el delta del río.^{32, 57, 64, 74, 95}
 - Grandes inundaciones, al menos cada diez años, de $3\,500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante septiembre, cuando los asentamientos humanos en las zonas de inundación lo permitan.^{57, 64, 71, 74, 94}
- En condiciones naturales, los caudales bajos son la condición dominante en muchos ríos mexicanos. Regresan a sus niveles de caudal base después de las lluvias (trópicos) o cuando han concluido los periodos de deshielo (zonas templadas) y las escorrentías de la zona de captación se han agotado.^{6, 56, 71} Los niveles de caudal bajo se sostienen por las descargas de los acuíferos al cauce y varían estacionalmente, imponiendo restricciones a las comunidades

acuáticas al determinar la cantidad de hábitat acuático disponible para el resto del año. Este proceso influye en la diversidad y número de organismos que pueden vivir en el río.^{8, 10, 67, 69, 76, 95} Por lo tanto, el abatimiento en la frecuencia, duración y periodicidad de estos caudales bajos repercutirá en la diversidad, composición, estructura y función del sistema fluvial.^{14, 56, 95}

Los caudales extremos bajos son predominantes en el estiaje y pueden poner en estrés a muchos organismos, pero pueden generar condiciones necesarias para otros. La fisicoquímica del agua, como temperatura y oxígeno disuelto, pueden llegar a ser considerablemente estresantes para muchos organismos, al punto de causar una mortalidad considerable^{9, 53, 66} Sin embargo, los caudales extremos bajos pueden concentrar en las pozas a ciertas especies que son presa de algunos depredadores, o pueden ser necesarios para generar sequía en las llanuras de inundación y provocar la muerte de algunas especies de plantas, o generar condiciones para la regeneración de otras (v. gr. cipreses).^{6, 7, 8, 10, 14 16, 37, 56, 68, 75} Es de esperar que la pérdida de estos en el río Santiago igualmente ha repercutido en la composición, estructura y función de las comunidades de flora y fauna del sistema, como se verá en el capítulo correspondiente a los análisis de preferencia de hábitat.

Los pulsos de caudal alto durante periodos cortos, causados por tormentas o deshielos y que no sobrepasan los niveles de máxima ribera, rompen las condiciones impuestas por el periodo de caudales bajos. Aun siendo de periodo corto, regulan la temperatura del agua y las concentraciones de oxígeno, y liberan materia orgánica que provee de alimento a los organismos libres o a las zonas de crianza, nutriendo a otro tipo de alimento para la red trófica del cauce.^{30, 60, 87, 102}

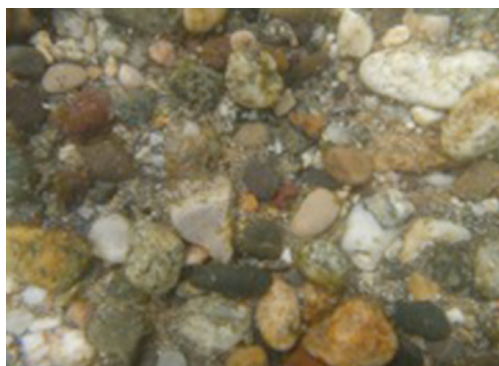
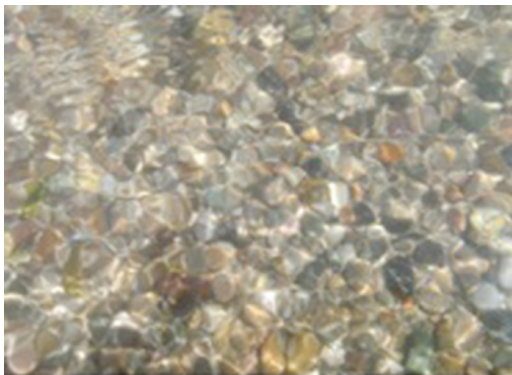
Los pulsos de caudal alto generan accesos a sitios de alimentación para peces y otros organismos móviles. Un caudal breve durante la inundación propicia condiciones para que peces y otros organismos móviles, puedan desplazarse aguas arriba, abajo o lateralmente dentro de la zona de inundación y humedales, generando el acceso a ciertos hábitats adicionales (canales secundarios, zonas someras, sitios apartados). Estos hábitats regularmente inaccesibles proveen de recursos alimenticios a las especies acuáticas.^{8, 10, 14 16, 37, 57, 61, 95}

Las variaciones posimpacto en la frecuencia, magnitud, periodicidad, tasa de cambio y duración de los pulsos de caudal alto en el Santiago, generan condiciones totalmente diferentes a las naturales previas a la construcción de la presa, aspecto que repercute en el reemplazo, abundancia y equidad entre las especies e índices de diversidad, como se observará en el capítulo correspondiente al análisis multivariado de preferencia de hábitat de los peces.

El agua de las zonas someras es más cálida que la del canal principal, por lo tanto, rebosan de nutrientes e insectos alimenticios porque crecen más rápido. Las pequeñas inundaciones son flujos que sobrepasan el canal principal e inundan el canal secundario, pero son poco frecuentes. Las pequeñas y grandes inundaciones modifican la estructura física y biológica del canal y de la zona de inundación. Estos caudales pueden barrer río abajo a los organismos, reduciendo algunas poblaciones, pero creando oportunidades competitivas nuevas para muchas especies. Las grandes inundaciones pueden también generar hábitats en las llanuras de inundación, humedales, lagos y derivaciones.^{8, 10, 16, 37, 58, 94, 95, 98, 101} En

el río Santiago, estos caudales han perdido principalmente su periodicidad y duración, alterando el ciclo hidrológico natural y,

consecuentemente, las señales etológicas que disparan la migración, ovoposición, crianza, etcétera.



Diferentes hábitats en el cauce del Río Verde (Oaxaca).

4.5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL HÁBITAT

El hábitat es el lugar donde viven las especies, incluyendo los componentes fisicoquímicos y biológicos con los que interactúan; o el lugar donde una especie, población o comunidad encuentra las características físicas, químicas y biológicas adecuadas para sobrevivir. En los ríos incluye la calidad del agua, rutas de migración, lugares de desove, sitios de descanso, alimentación y refugio contra los predadores y condiciones adversas del medio.^{12, 49, 70} La agencia federal del grupo de trabajo de restauración de corrientes de USA (Federal Interagency Stream Restoration Working Group, FISRWG, 1998), señala que los principales factores que controlan la calidad del hábitat disponible en los ríos son:

- La velocidad de la corriente.
- La estructura física del canal.
- La calidad del agua (temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, concentración de nutrientes, alcalinidad, etc.).
- Extensión de la zona riparia.
- Componentes bióticos del sistema.
- El hábitat acuático dentro del corredor fluvial.

Y que los procedimientos para evaluar el hábitat pueden utilizarse en diferentes tipos de estudios, como las evaluaciones de impacto ambiental y las medidas de mitigación y manejo del hábitat. Los métodos de evaluación del hábitat proporcionan información para comparar dos zonas: el valor relativo de diferentes áreas en un tiempo dado, o de la misma área en diferentes tiempos. Los proyectos de manejo y conservación en el hábitat acuático y terrestre se caracterizan por combinar estas estrategias.^{12, 26, 38, 50, 71}

Los conceptos básicos en los que se basan los procedimientos para la evaluación del hábitat se fundamentan en:

- El hábitat tiene una capacidad de carga finita, o adecuada, para soportar o producir ciertas poblaciones naturales.
- La adecuación de una especie en condiciones naturales puede estimarse mediante ciertas características físicas, químicas y biológicas del hábitat.

La adecuación de una especie al hábitat puede describirse mediante el índice *HSI*, con límites entre 0 (sin adecuación) y 1 (hábitat óptimo). El *HSI* es útil después de efectuar muchas evaluaciones previas sobre especies, poblaciones y comunidades. La unidad fundamental de medida en el Procedimiento de Evaluación del Hábitat (*Habitat Evaluation Procedures*, HEP) es la Unidad de Hábitat (HU), calculada a través de:

$$HU = \text{AREA} \times \text{HSI}$$

Donde HU es el número de unidades de área/hábitat. El área es la extensión del hábitat en unidades de área y *HSI* el índice de adecuación al hábitat (sin unidades). Un HU integra conceptualmente la cantidad y calidad del hábitat en una sola medida, y equivale a una unidad de hábitat óptimo.^{13, 41, 50, 67, 68, 88}

Sin embargo, para tomar decisiones, se requiere establecer las fronteras (sociales, económicas, políticas o biofísicas) del problema, definir los objetivos del estudio y seleccionar y evaluar a las especies. Una tarea principal consiste en delimitar las áreas de estudio directamente impactadas (como presas, lagos y reservorios) y otras aéreas impactadas colateralmente (como el cauce aguas abajo de la presa cuyo flujo, turbidez y temperatura experimenta alteraciones), o

cambios del uso del suelo en la ribera. También deben incluirse las áreas de crianza y desove de las especies terrestres y acuáticas que pueden ser afectadas. Generalmente, el equipo de trabajo para realizar estos estudios se integra con representantes de varias instituciones con diferentes enfoques. Además, algunos de sus miembros tendrán intereses diferentes respecto a los recursos en cuestión.^{13, 14, 15, 41, 50, 56, 67, 68, 71, 88, 95}

4.5.1 RECOMENDACIONES PARA LA RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL HÁBITAT

La restauración y conservación del hábitat en el río debe considerarse inmediatamente después de la construcción de los aprovechamientos hidráulicos, cuando la entrada en operación de la presa está modificando el régimen natural del caudal. Entonces, surge la necesidad de monitorear continuamente el río para detectar los impactos ambientales generados en el cauce, la zona de inundación, los humedales, los canales, estero y delta del río para elaborar las estrategias de conservación y recuperación del hábitat. García *et al.* (1995) señalan que la restauración puede efectuarse a través de:

- Seleccionar un tramo del río. Priorizando tramos con capacidad de carga y potencial para albergar peces y alta capacidad de recuperación natural.
- Evaluar los hábitats y su población de peces, priorizar los tramos de interés específico, determinar si el problema es de tipo biológico, químico o físico. Si es físico:
 - Estimar el escurrimiento base, definir el tamaño de la cuenca de drenado sobre mapas topográficos y geográficos, e identificar el tamaño del tramo y la magnitud de la rehabilitación.
 - Ubicar los principales tributarios y definir a gran escala sus perfiles e identificar discontinuidades que puedan causar cambios abruptos en la corriente (pozas, cascadas, etc.).
 - Definir el régimen del caudal del tramo mediante registros hidrométricos (flujos mínimos, frecuencia, curvas históricas de flujos, etc.); corregir discrepancias en el área de drenado; definir la magnitud y duración del flujo de incubación y desove para varios años, y determinar los flujos mínimos y máximos requeridos para reproducciones exitosas.
 - Analizar la geometría del cauce, inspeccionar el tramo y establecer la relación geométrica entre el tamaño del área de drenado y la descarga formadora del canal o descarga máxima y cuantificar los parámetros hidráulicos para diferentes descargas.
 - Rehabilitar el tramo inspeccionado y reparar el canal en cada una de las secciones analizadas.
 - Resumir los factores de preferencia biológica a partir de referencias regionales e investigaciones e identificar los factores limitantes (substrato, condiciones de flujo, refugios, etc.) para las especies o los estadios de vida de interés.
- Planear la implementación y estimar los resultados deseados en términos de cambios hidráulicos, mejoramiento de hábitats e incremento de poblaciones, e integrar el trabajo de selección y tamaño de la rehabilitación con los requerimientos de flujos.
- Seleccionar estructuras que, por su geometría y dinámica de flujo, deben reforzarse.



Hábitats del Río Verde, Oaxaca.

- Diseñar la prueba para los flujos máximos y mínimos, y los flujos deseados para periodos críticos derivados de las curvas de caudales histórica.
- Implementar los planes.
- Monitorear y evaluar los resultados.

4.6. MÉTODO DE PREFERENCIA DE HÁBITAT (APROXIMACIÓN MULTIVARIADA)

Es necesario estudiar minuciosamente la interacción entre las variables que determinan el hábitat para conocer los requerimientos de las especies, o cómo un sistema provee los requisitos necesarios para la vida de los peces y otras especies. Resulta complicado detallar la interacción entre las variables relevantes y las especies en un río,¹⁰ por lo que el análisis debe limitarse a los requerimientos de especies “indicadoras”. Este análisis se centra en los factores físicos que determinan el hábitat de

una especie (v. gr. los lugares donde es más probable encontrarla, o donde se reproduce) y el hábitat poco frecuentado (v. gr. donde es poco probable encontrarla, o donde se reproduce pobremente).^{48, 49, 67, 87, 96} En casos complicados, estas aproximaciones incorporan mucho más variables del hábitat que las físicas, e incluyen la estructura biótica (como otras especies que proveen alimento o competidores o depredadores) o patrones espaciales y temporales en la disponibilidad de recursos.^{12, 18, 37, 38, 41, 53, 70}

Los estudios basados en los requerimientos de las especies difieren en las variables seleccionadas, el muestreo para obtener los datos y los análisis para determinar las relaciones causales entre el ambiente y los atributos biológicos seleccionados. Los resultados pueden ser utilizados directamente para decidir qué acciones de restauración serán tomadas para obtener resultados deseados y evaluar sus probables consecuencias. Por ejemplo, la evaluación del hábitat puede identificar la producción pico (la acumulación de nutrientes en una estación o sitio) como factor limitante. En la práctica, este tipo de información es

frecuentemente comprometedor por el incompleto conocimiento de los requerimientos de hábitat de las especies.^{9, 10, 26, 38}

La complejidad de los métodos varía según el enfoque y las escalas de aproximación. Por ejemplo:

- a) la predicción de lo adecuado del hábitat *versus* el número de poblaciones,
- b) el análisis para un solo lugar en un tiempo dado *versus* la secuencia temporal de los requerimientos de la especies,
- c) el análisis de una sola especie blanco *versus* un tipo de especie involucrada en el comercio.

Estas dimensiones deben ser consideradas en la selección del análisis para la adecuada evaluación y manejo de los problemas.¹⁰

El análisis multivariado permite obtener información de la estructura de la comunidad que de otra forma pasaría inadvertida. Sus técnicas requieren de la identificación óptima del sistema biológico en estudio, pero economizan tiempo al analizar la información. Las estrategias de investigación pueden ser muchas y las diferentes partes del sistema pueden mostrar correlaciones que proporcionan valiosa información sobre su estructura y funcionamiento, pero el objetivo primordial se dirige hacia la reducción al número de variables que muestren las tendencias generales de los procesos analizados.^{10, 65, 104}

En esta sección se aplican los análisis de ordenación (componentes principales, CP), ordenación directa (correspondencias canónicas, ACC) y clasificación (*cluster*, AC) para:

- 1) estimar el impacto físico, químico y biológico sobre los peces,
- 2) evaluar los cambios en la composición de especies,
- 3) definir el hábitat que prefieren las principales especies del río, y
- 4) generar una estrategia de manejo de los caudales de la presa para la protección del hábitat de estas especies y su conservación ecológica.

4.6.1 CASO DE ESTUDIO: RÍO SANTIAGO, NAYARIT

El hábitat es utilizado por las especies acuáticas acorde con lo apropiado que resulte para completar su desarrollo. Conocer sus preferencias es indispensable para desarrollar modelos que reflejen en la mejor medida las condiciones adecuadas del medio. Una vez construidos los modelos y determinado el hábitat disponible (respecto a los diferentes caudales que circulan por el río), se puede determinar el caudal mínimo óptimo para el que maximiza el hábitat, tomando como referencia las preferencias de las especies acuáticas. Este caudal mínimo óptimo constituye una referencia de gran utilidad para determinar la disponibilidad del recurso hídrico para usos diferentes a los de conservación ecológica y, en su caso, el punto de partida para la negociación entre los usuarios del sistema.^{12, 28, 37, 38, 45, 70, 71}

Dada la importancia de conservar el sistema fluvial y la necesidad de contar con modelos que determinen los caudales ambientales idóneos para conservar el hábitat de las especies que habitan los ríos mexicanos, se

utiliza el análisis multivariado con el objetivo de describir las preferencias ambientales de los peces, determinar los indicadores de alteración y definir los escenarios principales que generen las medidas de mitigación, y las estrategias de manejo del río.

4.6.2 METODOLOGÍA

Se realizaron campañas de muestreo en febrero, mayo, septiembre y noviembre para evaluar los cambios estacionales. Los datos fisicoquímicos y los peces se obtuvieron en cuatro secciones del río (B1, ... B4) que presentaron variaciones en la profundidad, velocidad de corriente, cubierta vegetal y sustrato. La sección B1 presenta rápidos y pozas de diferentes grados de pendiente en el fondo; la B2 pendiente moderada; la B3 aguas profundas, y la B4 pendiente moderada contraria a la corriente. La profundidad y velocidad de la corriente se midieron con un molinete Rosbach-Price, aplicando el método de los 6/10, para profundidades menores de 1m, y los 2/10 y 8/10 para profundidades mayores de 1 m (profundidades correspondientes al 60, 20 y 80% desde la superficie libre del agua, respectivamente). El sustrato extraído de una área de 50 x 50 cm en cada sección fue clasificado con cribas, siguiendo el siguiente criterio (en mm): lodos (0.5), arena (0.5-10), grava (10-130), piedras (130-500), rocas (500-1,500) y grandes rocas (>1,500). La vegetación se clasificó como: a) sin vegetación, superficie del agua totalmente expuesta a los rayos solares, b) superficie del agua sombreada por la vegetación, y c) vegetación sumergida (hojas, troncos, ramas y/o raíces). El oxígeno disuelto se midió con un oxímetro YSI; la conductividad y sólidos disueltos totales con un conductímetro Hach DRL-2000 (Figura 4.6.1).⁴²

El muestreo de los peces fue sistemático-estratificado con redes de 30 m de largo, 2 m de ancho y 1 cm² de luz de maya, las cuales fueron lanzadas tres veces en cada sitio. La técnica de recolección considera que la posición original de los peces no podía ser determinada debido al alto grado de turbidez en la época de lluvias, a la profundidad, a la alta velocidad de la corriente, a los requerimientos de operación de la presa, a la longitud y al ancho del río y a la presencia de cocodrilos. Los peces fueron preservados en una solución de formalina al 10%. Las muestras se depositaron en la colección ictiológica de la Escuela de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. Las especies fueron clasificadas de acuerdo con los criterios de Álvarez (1970) y Castro-Aguirre (1978). Cada pez fue medido, pesado y clasificado por su edad. El rango de cada clase dependió de la talla.^{42, 45, 46, 80}

Los datos se vaciaron en una matriz con las variables: sitio, hora, velocidad de corriente, profundidad, sustrato, vegetación, oxígeno disuelto, sólidos disueltos, conductividad, especies ícticas, estado de desarrollo, peso, longitud, abundancia, riqueza específica y diversidad (*Shannon-Weiner Index*). Se aplicaron los análisis multivariados 1) CP, para identificar gradientes ambientales; 2) AC, mediante distancias euclidianas y promedios no ponderados), para definir grupos ambientales, y 3) ACC, para determinar el hábitat de preferencia de los peces. En todos los casos se empleó el software *TWINSPAN & DECORANA*.^{42, 45, 46, 80} Para mayor descripción, consultar García et al. (1999) y González-Villela (2007).

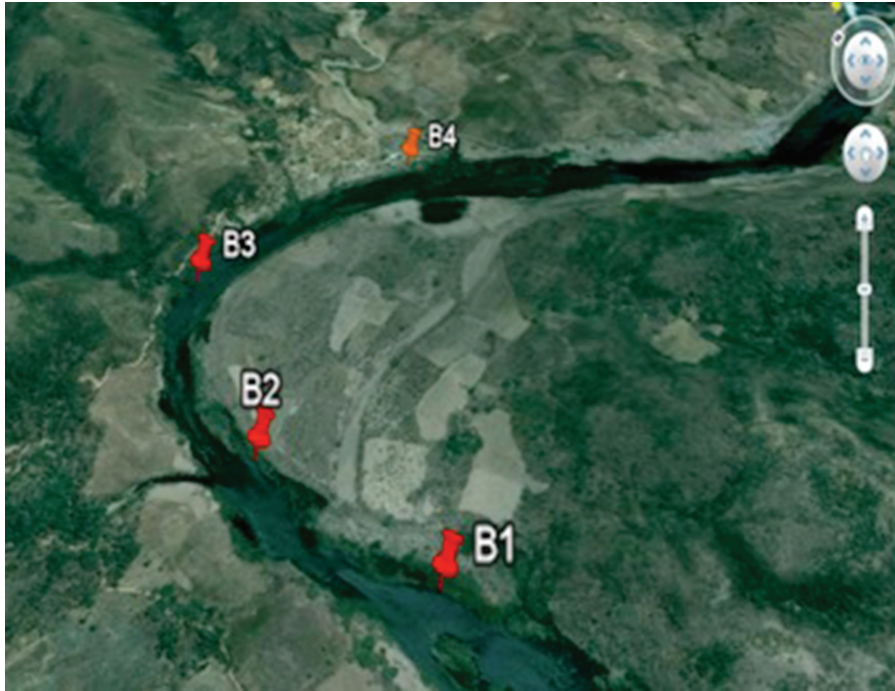


Figura 4.6.1. Ubicación de los sitios de muestreo de los peces (B1 a B4).

4.6.3 RESULTADOS

Se capturaron 6 911 individuos pertenecientes a seis especies secundarias (s) tolerantes a los cambios de salinidad, y seis primarias (p) estrictas de agua dulce (Tabla 4.6.1). De estas últimas, tres son nativas (n) y tres introducidas (i). Las más abundantes fueron *Lepomis macrochirus* y *Poeciliopsis latidens* (Anexo 9). Se observó una substitución de especies entre 1992 y 1997 (sólo 33% de las originales permanecieron); la relación nativas/introducidas fue de 1. García *et al.* (1999) señalan que las características fisicoquímicas observadas garantizaron un hábitat adecuado para los peces.^{42, 45}

Componentes principales (ACP). El componente principal 1 (CP1) capturó el 31.29% de la variación y fue una composición de la conductividad (0.47), sólidos disueltos totales (0.47), oxígeno (0.46) y velocidad de la corriente (0.38), contrastando ligeramente con la arena (-0.11). El segundo componente (CP2) explicó el 19.89% de la variación y contrastó las grandes rocas (0.47), la profundidad (0.43) y las rocas (0.4) versus la arena (-0.41), la grava (-0.21) y las piedras (-0.71). El tercer componente (CP3) explicó el 11.3% de la variación y fue también un contraste entre la arena (0.52), la vegetación (0.41) y el lodo (0.29) versus las grandes rocas (-0.33) y la velocidad de la corriente (-0.28).

Tabla 4.6.1. Análisis comparativo de la comunidad de peces para los años 1992 y 1997 en el río Santiago, Nayarit (modificada de García et al., 1999).

Núm.	Especies en 1992	Especies en 1997	Núm. ejemplares	Total
1	<i>Cyprinus carpio</i>	<i>Lepomis macrochirus</i> (p)(i)	3 596	52.03
2	<i>Notropis sp.</i>	<i>Poeciliopsis latidens</i> (p)(n)	1 329	19.23
3	<i>Yuriria alta</i>	<i>Poecilia sphenops</i> (p)(n)	573	8.29
4	<i>Moxostoma austrinum</i>	<i>Micropterus salmoides</i> (p)(i)	349	5.05
5	<i>Ictalurus dugesi</i>	<i>Cichlasoma beani</i> (p)(n)	324	4.69
6	<i>Arius liropus</i>	<i>Dorosoma smithii</i> (s)	287	4.15
7	<i>Gobiesox fluviatilis</i>	<i>Lile stolifera</i> (s)	250	3.62
8	<i>Poecilia reticulata</i>	<i>Atherinella crystallina</i> (s)	177	2.56
9	<i>Poeciliopsis latidens</i>	<i>Agonostomus monticola</i> (s)	15	0.22
10	<i>Atherinella c. crystallina</i>	<i>Agonostomus monticola</i> (s)	5	0.07
11	<i>Cichlasoma beani</i>	<i>Oreochromis mossambicus</i> (p)(i) (p)(i)	4	0.06
12	<i>Oreochromis mossambicus</i>	<i>Gobiidae</i> (s),	2	0.03
13	<i>Agonostomus monticola</i>			
14	<i>Awaous trasandeanus</i>			
15	<i>Poecilia blutleri</i>			
		TOTAL	6 911	100

(p) = primarias, (i) = introducidas, (n) = nativas, (s) = tolerantes

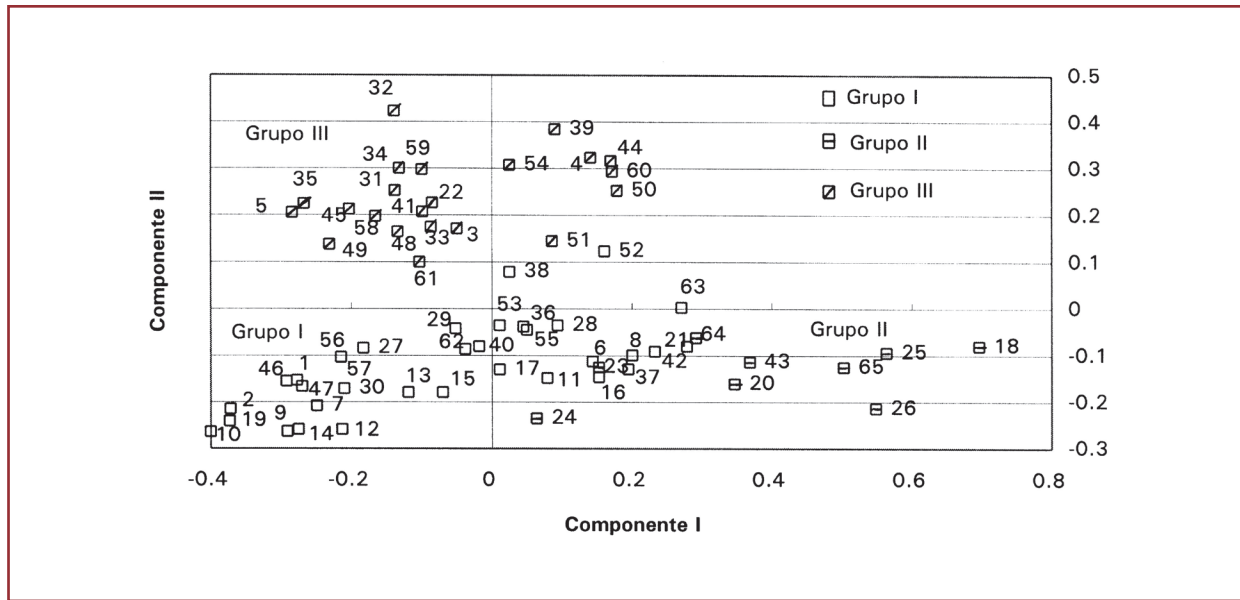
Los resultados revelan tres ambientes principales: Grupo I, áreas arenosas, poca vegetación, con pendiente moderada, profundidades medias a someras. Grupo II, ligeramente profundos con rápidos y velocidad alta de la corriente, contenidos altos de oxígeno y sólidos disueltos, con rocas y

grava en el sustrato. Grupo III, áreas profundas con cubierta vegetal, corrientes lentas, rocas grandes y lodo intersticial. Las Figuras 4.6.2a y 4.6.2b muestran la distribución de los sitios y el peso de las variables ambientales en el espacio grafico de los componentes principales.^{42, 45, 47, 80}



Presa Aguamilpa y río Santiago.

(a)



(b)

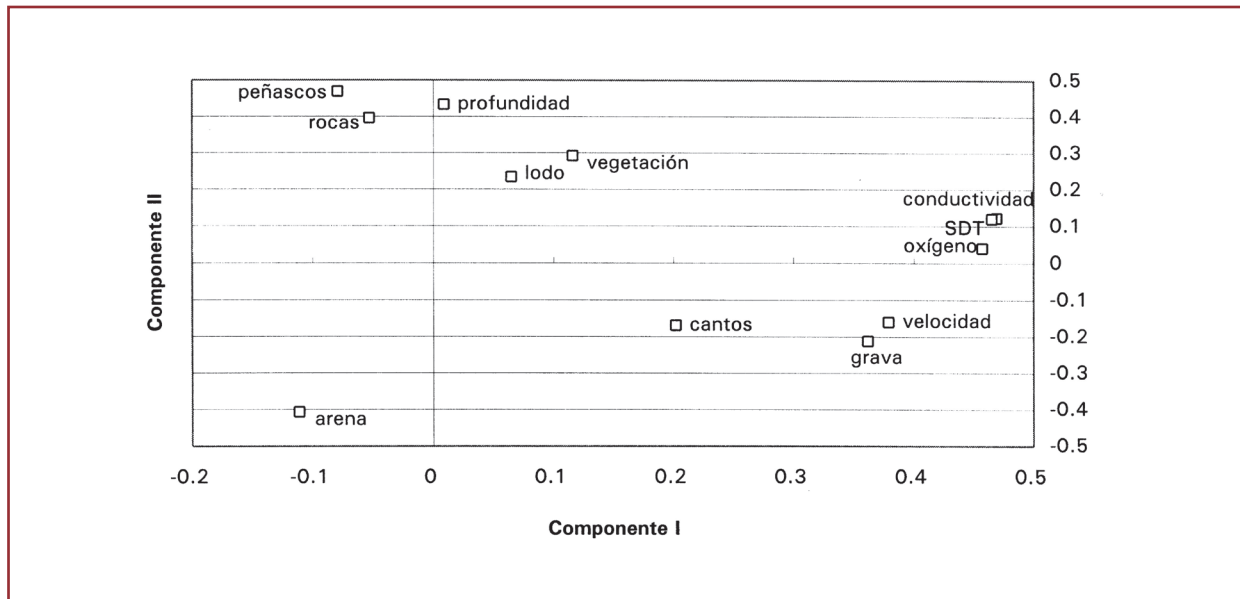


Figura 4.6.2. a) Distribución de los sitios de muestreo y b) pesos de las variables ambientales sobre los componentes I y II (García *et al.*, 1999).

Clusters (AC). El AC clasificó los sitios en tres grupos (Figura 4.6.3). El Grupo I, con 11 submuestras, con velocidad de la corriente moderada (0-0.29 ms^{-1}), con un promedio de 0.13 ms^{-1} , profundidad de 0.53 a 1.67 m, sustrato arenosos (60–100%) y vegetación escasa. Este

grupo presentó número alto de especies de peces (7-10) e individuos pequeños, por lo que se considera como áreas de crianza. El Grupo II, con siete submuestras, caracterizado por alta velocidad de corriente (0.24-0.57 ms^{-1}), profundidad de 0.38 a 1.70 m, con arena y alto contenido de

grava (60-100%) y rocas ocasionales, cubierta vegetal escasa y expuestas al sol. El Grupo III, con 12 submuestras, velocidad de corriente moderada ($0-0.29 \text{ m s}^{-1}$), grandes profundidades (0.47-4.0 m), rocas pequeñas y grandes (70-80%), con o sin cubierta vegetal.

La segregación espacial de *Poecilia sphenops* y *Poeciliopsis latidens* en las áreas someras del Grupo I explica su baja diversidad de especies; *Dorosoma smithii* domina en los rápidos (Grupo II) y *Lepomis macrochirus* en las áreas profundas del Grupo III.^{42, 45, 47}

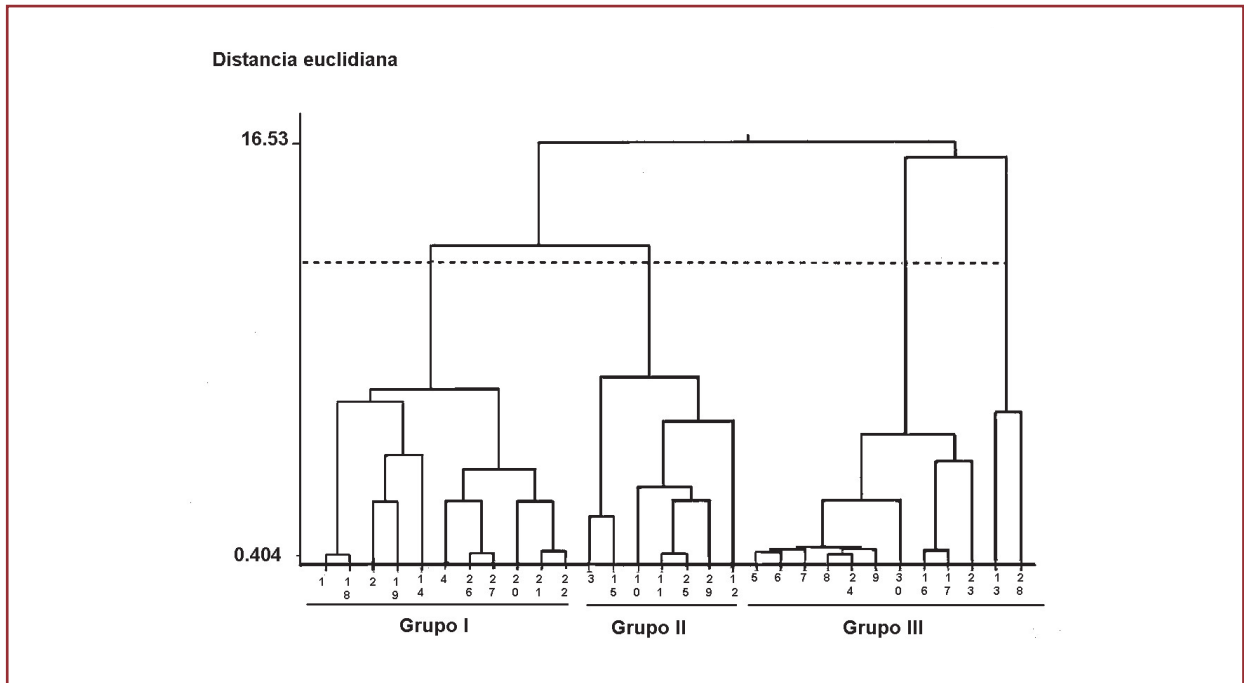


Figura 4.6.3. Clasificación de los sitios de muestreo en el análisis de similitudes, río Santiago.



Correspondencias canónicas (ACC). Los tres primeros discriminantes explicaron el 79% de la varianza en la abundancia de especies.

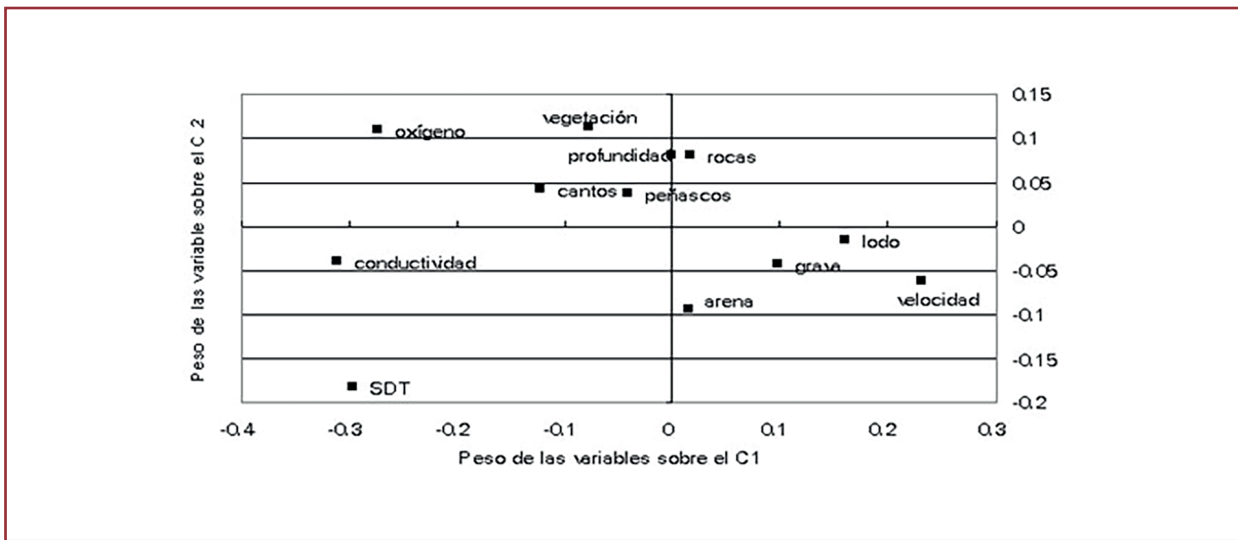
La distribución de los pesos asignados a las variables abióticas y a las especies, asoció a *Atherinella crystallina*, *Agonostomos monticola*,

Awaous tajasica, *Poecilia sphenops* y *Poeciliopsis latidens* con un hábitat de agua somera, con arena y algo de grava y velocidad de corriente media (Figuras 4.6.4a y b). Lugares del Grupo I de la Figura 4.6.4a.^{42, 45}

Mientras que *Dorosoma smithii*, *Oreochromis mossambicus* y los góbidos se asociaron a sitios con poca cubierta vegetal y raíces sumergidas, grava y velocidad de corriente alta

(similares al Grupo II). *Lepomis macrochirus*, *Cichlasoma beanii* y *Micropterus salmoides* se asociaron con sitios sin cubierta vegetal, sustrato rocoso, velocidad baja de corriente, profundos, sólidos disueltos y conductividad altos y concentración de oxígeno intermedia (similar al Grupo III). *Lile stolifera* se asoció a ribera rocosa con lodo y cubierta vegetal, agua profunda y velocidad moderada de corriente (Tabla 4.6.2).^{42, 45, 47, 80}

(a)



(b)

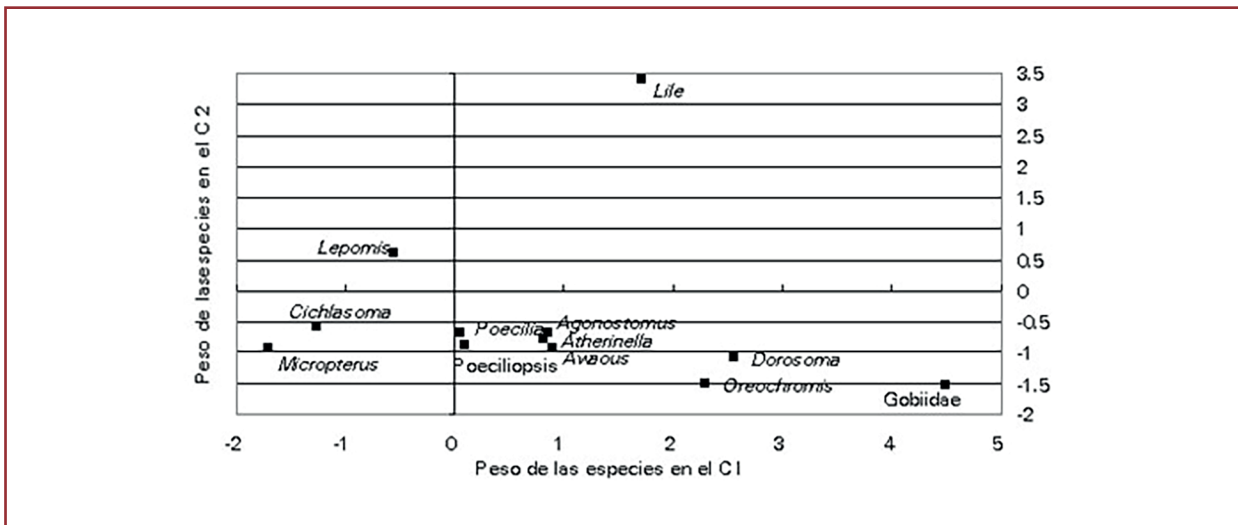
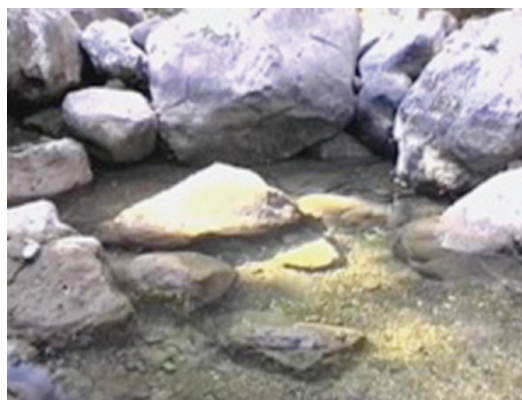


Figura 4.6.4. Pesos de las variables abióticas y de las especies en el ACC (García *et al.*, 1999)

Tabla 4.6.2. Agrupación de los peces por sitios (hábitats) en el Río Santiago.

Grupo	Sitios	Tipo de sitio	Especie
1	34	Sitios arenosos con vegetación, pendiente moderada, profundidad media, velocidad de corriente moderada y alta diversidad. Zona de alimentación.	<i>Atherinella crystalina</i> <i>Agonostomus monticola</i> <i>Awaous tajasica</i> <i>Poecilia sphenops</i> <i>Poeciliopsis latidens</i>
2	9	Áreas totalmente expuestas al sol, sustrato de rocas y grava, mediana profundidad, rápidos, alto contenido de sólidos disueltos y oxígeno, corriente fuerte y baja diversidad.	<i>Dorosoma smithii</i> <i>Oreochromis mossambicus</i> <i>Gobiidae spp</i>
3	22	Áreas sin cubierta vegetal, grandes rocas y lodo, pozas profundas, corriente lenta, baja diversidad. Sitios de caza para depredadores.	<i>Lepomis macrochirus</i> <i>Cichlasoma beani</i> <i>Micropterus salmoides</i>
	1	Áreas con cobertura vegetal, peñascos y lodo intersticial, profundas con corriente lenta.	<i>Lile stolifera</i>



Ambientes correspondientes a los Grupos I y III en el río Santiago, Nayarit.

4.6.4 DISCUSIÓN

Ictiofauna: las especies ícticas nativas del río Santiago presentaron la misma proporción (50%) que las introducidas (50%), implicando una sustitución de especies (González-Villela y Banderas, 2007), en detrimento de las nativas y de la riqueza específica (Tablas 4.6.2). El registro de especies no reportadas implica un cambio en la composición y estructura de la comunidad respecto a 1992. Los cambios en presencia y

abundancia de las especies entre 1992 y 1997 se atribuyen al acelerado crecimiento poblacional, a la incorporación de las riveras a la agricultura, a la creciente industrialización y al cambio de régimen del caudal por el control de la presa Aguamilpa, acciones todas que modifican el ambiente.^{66, 96}

La regulación del río tiende a reducir su efecto erosivo aguas abajo de la presa y modifica el balance entre gradación y degradación de los sedimentos, lo que, coadyuvando con las especies

exóticas introducidas, generan una presión intensa y continua sobre la comunidad de peces nativos, disminuyendo su diversidad.^{39, 42, 45, 46, 80}

Según la definición de Moog y Chovanec (2000), el río presenta un nivel de alteración correspondiente a “un ecosistema significativamente perturbado, con alteraciones en el subsistema ripario y grandes cambios en la composición de la comunidad”.

La ordenación mediante el análisis de CP y la clasificación de las variables abióticas con el AC (Figuras 4.6.2 y 4.6.3) revelaron tres ambientes. Mientras que la ordenación directa (ACC, Figura 4.6.4) identificó por lo menos tres tipos de asociaciones y un hábitat particular del Grupo III, caracterizado con *Lile stolifera*, la cual prefiere una cubierta vegetal abundante y aguas profundas de poca corriente.

Poecilia sphenops y *Poeciliopsis latidens* coincidieron en aguas someras, con sustrato arenoso y vegetación escasa (Grupo I). Ambas son especies pequeñas que se alimentan de detritus, hábito que conservan hasta la madurez, como muestra el contenido estomacal. *Atherinella crystallina*, *Agonostomus monticola* y *Awuaous tajasica* prefirieron sitios donde la velocidad moderada de la corriente sedimenta el alimento, también considerados como zonas de refugio puesto que la baja profundidad limita la actividad depredadora de los peces grandes. Estas zonas son utilizadas como lugares de crianza por otras especies, por lo tanto, presentaron valores altos de riqueza específica (4.23) y de diversidad (1.02), coincidiendo con otros ecosistemas.^{3, 31, 40, 41, 45, 46}

Dorosoma smithii es una especie detritívora aquí asociada con lugares arenosos con grava, agua somera y corrientes rápidas (Grupo II), porque prefiere aguas bien oxigenadas con

materia orgánica en suspensión. A *Lile stolifera* se le asoció con aguas profundas, de poca corriente y vegetación sumergida (Figura 4.6.4). Especies secundarias y anfidromas aparecen estacionalmente en esta parte del río. Su presencia demuestra la gran estabilidad de la temperatura de las regiones tropicales. La fluctuación anual en el nivel del agua es más determinante en estas áreas. Los ciclos biológicos de las especies están adaptados a varios tipos de corrientes en contraste con las zonas templadas.^{30, 31, 46, 60}

Lepomis macrochirus, *Micropterus salmoides* y *Cichlasoma beani* son predadores en pozas profundas de corriente lenta, alta conductividad y sólidos disueltos suspendidos, orillas con sustrato rocoso apropiadas para la crianza (Grupo III), mínima perturbación y ricos en recursos donde la sobrevivencia es controlada por exclusión competitiva.^{31, 101} Aquí, los juveniles y adultos de *C. beani* y *L. macrochirus* se alimentan de copépodos y pequeños moluscos. *L. macrochirus* también consume insectos y peces pequeños, puesto que el alto contenido de sólidos disueltos favorece el desarrollo del plancton y abundantes insectos que se posan en la superficie del agua. La presencia de estos depredadores obliga a los pequeños poecílicos a buscar aguas someras y, como los fitófagos, no frecuentan áreas profundas; en estos lugares la riqueza específica y la diversidad fueron más bajos (2.77 y 0.70, respectivamente).^{42, 45}

Vegetación: los humedales son reconocidos como hábitats altamente productivos para especies amenazadas o en peligro de extinción. La vegetación riparia y las zonas de inundación se encuentran entre los ecosistemas más ricos de la Tierra, con gran diversidad biótica y biomasa por unidad de área, donde se realizan funciones críticas para el mantenimiento y vitalidad de los

recursos acuáticos, en comparación con el resto del ecosistema.^{39, 45, 46, 66, 75}

La vegetación de las zonas riparias amortigua los cambios de temperatura y del nivel de la superficie libre de agua en los ríos, conservando un microclima estable adecuado para el crecimiento de las comunidades acuáticas.⁵² Bayley (1995) señala que el avance y retroceso del agua en las zonas de inundación incrementa la productividad biológica y mantienen la diversidad.

La vegetación sumergida en las áreas inundadas durante las lluvias ofrece alimento abundante entre las raíces a los peces que se refugian contra depredadores entre el follaje, optimizando el hábitat para la sobrevivencia y crecimiento.^{54, 62, 72}

Si bien las especies están adaptadas a los cambios en el flujo del río, en este estudio se puntualiza la importancia de asegurar la presencia de, al menos, los tres tipos de ambientes descritos. La reducción drástica en el flujo del río puede modificar la abundancia de una o más especies si las áreas de inundación y la vegetación de la ribera disminuyen o desaparecen. Estos cambios podrían afectar a las especies pequeñas como los poecílidos, principalmente, a detritívoros u omnívoros de las zonas someras con flujos medios o bajos y con altos niveles de sedimentación. Un decremento constante del flujo podría reducir las áreas rocosas, afectando también a las grandes especies depredadoras y territoriales que prefieren las áreas profundas con sustrato rocoso para la crianza y anidación (*Lepomis macrochirus*, *Cichlasoma beani*, *Micropterus salmoides*).

Por otro lado, un incremento repentino y descontrolado en el flujo del río puede erosionar el sustrato y barrer a la comunidad de invertebrados, fuente primordial de alimento

para los peces, y afectar la cubierta vegetal tan importante para las diferentes actividades de los peces, modificando su abundancia y diversidad. La relación entre la descarga y la diversidad de especies terrestres y acuáticas es una característica propia de las zonas de inundación de los ríos.^{26, 79}

En el río Santiago la expansión y retraimiento de las aguas está relacionada con las estaciones. El invierno es el periodo de mayor retraimiento del caudal cuando predominan los procesos hidrológicos subsuperficiales y la máxima fragmentación del hábitat. En el verano, la expansión del canal es máxima, predominan los procesos hidrológicos, los aportes superficiales y someros son mayores, la temperatura se incrementa especialmente en zonas donde el dosel es escaso o nulo, y la zona de inundación se sumerge. En contraste, en los ríos de las zonas templadas el deshielo es la fuente principal de agua y la máxima expansión ocurre al inicio de la primavera.⁴⁵

La relación entre la biota y los aspectos estructurales del hábitat son evidentes en las aproximaciones a nivel de meso-hábitat para la conservación, rehabilitación y manejo de los ríos.⁶⁵ Los cambios artificiales en el flujo del río y en el régimen de sedimentación alteran la naturaleza física del canal y por lo tanto del hábitat, obligando a establecer un régimen de flujo adecuado mediante el manejo de la presa. Es necesario un pulso predecible por la comunidad acuática para mantener la productividad y prevenir el deterioro de la biota y de las zonas de inundación del río.

La aproximación multivariada en la evaluación de los ríos proporciona una perspectiva integradora sobre la interacción de los procesos

ecológicos del sistema ripario, aspecto esencial en la generación de iniciativas para el manejo y la conservación. La información sobre los requerimientos de flujo para los peces, las actividades de recreación y productivas, la calidad del agua y las curvas de abundancia de *Dorosoma smithii* y de simulación del hábitat, permiten predecir los cambios del hábitat cuando se modifican los flujos.

Los métodos para evaluar el hábitat físico con fines conservacionistas han sufrido cierto rezago, en comparación con la cuantificación de la calidad del agua. Sin embargo, actualmente los procedimientos de protección y restauración a través del análisis del hábitat a diferentes escalas han sido bien aceptados por la comunidad científica como relevantes en la conservación de la salud de los ecosistemas. La complejidad de los problemas ambientales requiere la participación de la ecología en la administración de los ríos. Los ecólogos deben tener un papel primordial en el avance del conocimiento, en la implementación apropiada de la normatividad, en la educación de la población en relación con los procesos e interacciones ecológicas del medio y en las consecuencias de la actividad del hombre en el deterioro ambiental.^{8, 9, 10, 13, 14, 15, 45, 50, 62}

Escenarios: la distribución y abundancia de las especies en el tramo estudiado puede explicarse en orden prioritario por las variaciones fisicoquímicas del agua, la profundidad, la velocidad de la corriente y el tipo de substrato y vegetación terrestre; variables susceptibles a la sucesión natural de las estaciones y/o a la

variación artificial provocada por el manejo del caudal descargado de las presas.

La modificación del régimen natural del flujo aguas abajo de la presa Aguamilpa afectó a la ictiofauna, al modificar la sedimentación, disponibilidad de alimento, estímulos migratorios, éxito en la migración, reproducción, sobrevivencia de los estadios huevo y juvenil, requerimientos espaciales y la composición de especies.

Las especies que habitan en el río están adaptadas a los cambios en el gasto, pero es importante asegurar la permanencia de los tres tipos principales de hábitats detectados:

- Las zonas de vegetación sumergida y aguas someras donde abundan las especies pequeñas (poecílicos) y detritívoras u omnívoras, que se desplazan hacia sitios someros y áreas de inundación con velocidades de corriente moderadas a bajas, donde existe alta sedimentación y disponibilidad de alimentos alóctonos.
- Áreas profundas entre rocas y peñascos para los depredadores territoriales, que prefieren zonas con pared abrupta y substrato rocoso para nidificar, con alto contenido de sólidos disueltos que favorecen el establecimiento de comunidades planctónicas, la oxigenación y la permanencia de insectos en la superficie.
- Lugares arenosos de poca profundidad y alta velocidad de la corriente con materia orgánica en constante suspensión o zonas de corrientes rápidas.



Río Santiago.

4.7. SIMULACIÓN DEL HÁBITAT (IFIM-PHABSIM)

El software *PHABSIM* (*Physical Habitat Simulation System*) es parte de un extenso compendio de análisis dirigido al manejo de los caudales en los ríos, llamado metodología IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*), que proporciona las herramientas para resolver los problemas relacionados con las aguas corrientes. La *IFIM-PHABSIM* fue creada para generar las estrategias de manejo de los ríos. La metodología está dirigida hacia la evaluación de las condiciones del hábitat dentro del cauce con el fin de proponer un régimen de caudal alternativo en ríos alterados por la construcción de presas, derivaciones, extracciones, etcétera.

Para determinar el caudal ecológico en el río Santiago, se aplicó la metodología IFIM para cuantificar el “hábitat disponible” consecuente a la construcción de la presa Aguamilpa. La metodología requiere información sobre las condiciones ambientales idóneas para las especies. En la metodología IFIM, este conocimiento está definido por alguno de los siguientes criterios de preferencia de hábitats:

- 1) Categoría I, basada en el juicio profesional por carencia o poca disponibilidad de datos.
- 2) Categoría II, se basa en localizar y describir genéricamente el microhábitat de interés y analizar los organismos que lo habitan. En estos estudios generalmente la información de las condiciones ambientales donde se encuentran los organismos (peces, invertebrados, etc.), es incompleta.
- 3) Categoría III o criterio de *preferencia de hábitats*, que complementa la información sobre las condiciones ambientales.^{13, 50, 54, 64, 68}

La metodología IFIM requiere de un plan de trabajo con metas y resultados esperados. El plan de estudio debe incluir las estrategias y métodos de análisis y determinar las posibles fuentes de error o sesgo. Por lo tanto, se debe considerar:

- 1) Propósito u objetivo, así como la intención del estudio. Cada estudio debe contar con diferentes tipos de metas según sea el criterio de análisis elegido.

- 2) Selección de las especies. Debe efectuarse por la convergencia de intereses de las comunidades o gremios involucrados (una o dos especies, o asociación de especies previamente estudiadas), de tal manera que la base de datos crezca tanto como sea posible. Decisión emitida de acuerdo con la importancia (social, económica, política o científica) de las especies y sus adaptaciones al hábitat, así como de la información disponible para un área en particular o tipo de corriente.
- 3) Estratificación de los datos. Para el análisis adecuado de las especies, de los cambios temporales y espaciales del microhábitat y sus patrones de utilización (divisiones por clases, tamaños, grupos, usos diurnos, nocturnos, patrones de actividad, tolerancias a las variaciones hidrológicas e hidráulicas en función del tipo de sustrato y cubierta vegetal) de las especies previamente estudiadas (análisis multivariados).
- 4) Protocolo de muestreo o descripción. Se requiere formalizar las variables, así como los procedimientos para la obtención y registro de los datos. Con esto se incrementa la consistencia del análisis. Las unidades de medición deben ser claramente definidas.
- 5) Estrategia de muestreo. Adecuada para evitar sesgos o desproporciones en la muestra. Es necesario un adecuado tamaño de la muestra para conservar la precisión y facilitar el ajuste de la función a la distribución de frecuencias observadas. Generalmente de 150 o 200 observaciones son suficientes para generar un histograma representativo de la población analizada.

El diseño del método y equipo de muestreo para capturar los peces en estudio no es el mismo en diferentes ambientes. Una vez colectados, los datos deben interpretarse con gráficas; esto implica el trazado de curvas uni o multivariadas y el ajuste de funciones. Existen tres aproximaciones básicas para determinar el área de utilización o preferencia de hábitat: a) los histogramas, b) los límites de tolerancia no paramétricos, y 3) el ajuste de funciones.^{13, 50, 64, 88}

El software *PHABSIM* utiliza una aproximación modular y jerárquica, combinada con técnicas de simulación en computadora para cuantificar los componentes básicos y las interacciones ambientales. El componente modular representa la generación por bloques de información para la simulación. La calidad del hábitat físico es función del caudal y varía con la calidad y cantidad del régimen de flujo, y se acompaña del conocimiento de la estructura física del río y de la corriente. En cambio, la modificación del hábitat físico por la temperatura y la calidad del agua se analiza por separado en la simulación del hábitat físico. Como la temperatura del agua varía con las condiciones meteorológicas locales y estacionales, con la configuración de la corriente en cada tramo, y con el régimen de flujo en el cauce, ejerce su influencia en el hábitat y debe analizarse con base a un sistema de corrientes. La calidad del agua en condiciones naturales, además está influenciada por los materiales geológicos y las actividades antrópicas, mismas que incrementan el rango de variación en la calidad del agua. Estas también deben ser analizadas.^{13, 38, 50, 64, 70, 88}

Las curvas o modelos de preferencia de hábitat de los organismos indicadores dependen de las características hidráulicas y físicas del cauce. Estas curvas describen la combinación de tipo de sustrato, cobertura vegetal, profundidad

y velocidad de corriente conveniente para los organismos en el tramo. El cálculo del hábitat se realiza a partir de las profundidades y velocidades simuladas y de la información de substrato y cobertura vegetal. Al hábitat calculado se le conoce como “área ponderada utilizable” (*Weighted Useable Area*, WUA), y se mide en metros cuadrados de espejo de agua por cada 1 000 m de río estudiado en dirección longitudinal (USGS, 2001). Acorde con la metodología IFIM, la obtención de curvas de preferencia de hábitat y simulación de la hidrodinámica del tramo en estudio, requiere introducir datos topográficos, batimétricos, hidráulicos y biológicos al *software PHABSIM* para la determinación del área potencialmente utilizable en respuesta a las variaciones del caudal, como se verá a continuación.^{13, 50, 64, 87}

4.7.1 CASO DE ESTUDIO: RÍO SANTIAGO, NAYARIT

El número de campañas de muestreo se estableció con base en la variación estacional y el régimen de caudales del tramo en estudio, dada su influencia en el comportamiento de los peces.



Río Santiago.

Las cuatro campañas de muestreo coincidieron con el final de los periodos de cambio de caudal, a fin de cuantificar los cambios en la hidrología y distribución de los organismos como consecuencia de las variaciones en el régimen de caudales y selección de hábitats, como se señala en García *et al.* (1999).

4.7.2 MÉTODOS

4.7.2.1. Parámetros físicos

El muestreo de las variables fisicoquímicas y biológicas fue sistemático-estratificado. El análisis hidrológico (IHA) incluyó topografía, velocidad de la corriente, tipo de sedimentos y profundidad para definir la superficie libre del agua en celdas verticales distribuidas a lo ancho de las ocho secciones transversales, cuya ubicación se muestra en el plano de la Figura 4.7.2.1. La velocidad de la corriente se determinó como se describió en el capítulo anterior. En cada franja se registró el tirante de agua y la velocidad. La profundidad media se obtuvo promediando las mediciones de profundidad puntual en las ocho secciones.



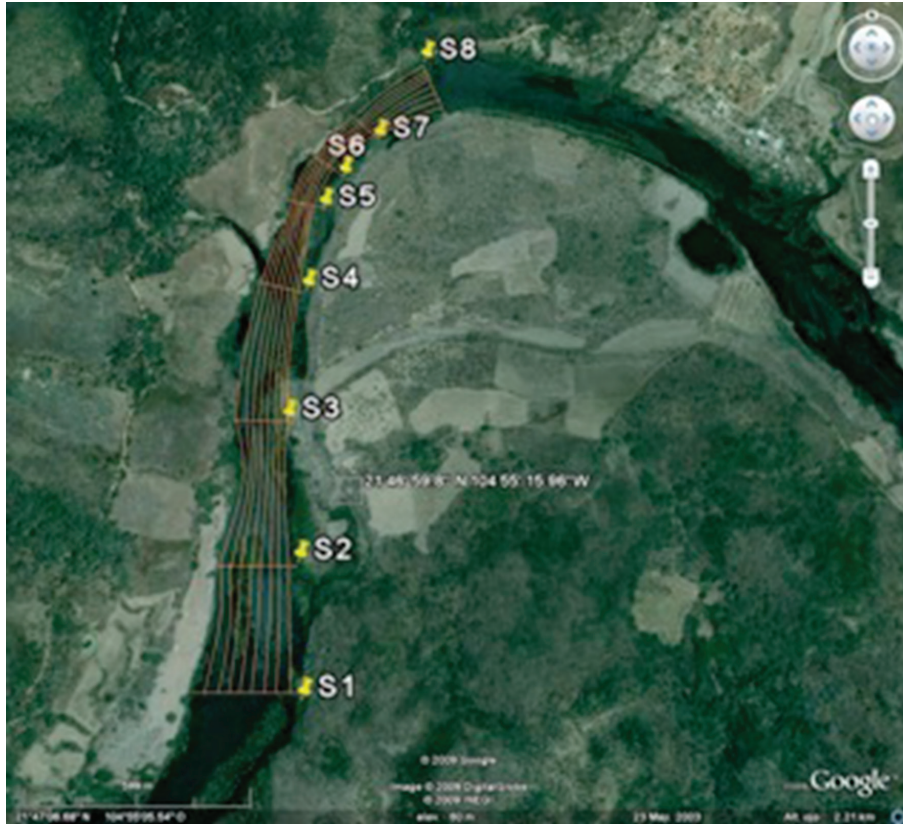


Figura 4.7.2.1. Agrupación de los peces por sitios (hábitats), en el río Santiago.

El levantamiento topográfico a lo largo de los 1 524 m del río se apoyó en una poligonal abierta situada en el margen derecho, con relación a la dirección de la corriente, y ocho secciones transversales; dos de ellas en la zona de control hidráulico (secciones 1 y 2), tres en zona de pendiente moderada (3, 4 y 5) y tres en zona profunda (6, 7 y 8), ubicadas mediante mojoneras. Se realizaron aforos en cada sección y se determinaron las curvas de nivel del suelo respecto a un banco con coordenadas geográficas $X = 507600.000$, $Y = 2406400.000$ y $Z = 58.800$. Siguiendo a García *et al.* (1999), la Figura 4.7.2.3 muestra el perfil longitudinal del tramo de río analizado.

Los levantamientos topográficos transversales se efectuaron cada 50 m. La batimetría tuvo con una aproximación de 1 cm en área y elevación en las ocho secciones (Anexo 7). La información topográfica e hidrométrica para la sección 1 (zona de control hidráulico), se encuentra en las hojas de registro del Anexo 8, con el orden requerido para alimentar el *software*.⁴¹

Se hicieron coincidir el centro del área de 50 cm de lado (donde se determinó el tipo de sustrato), con la intersección del fondo y las verticales situadas cada 6 m río adentro de las mojoneras, en las secciones transversales que coincidieron con uno de cada tres puntos en los que se midió la velocidad media de la corriente. El sustrato y la vegetación se determinaron como se describe en el capítulo anterior.

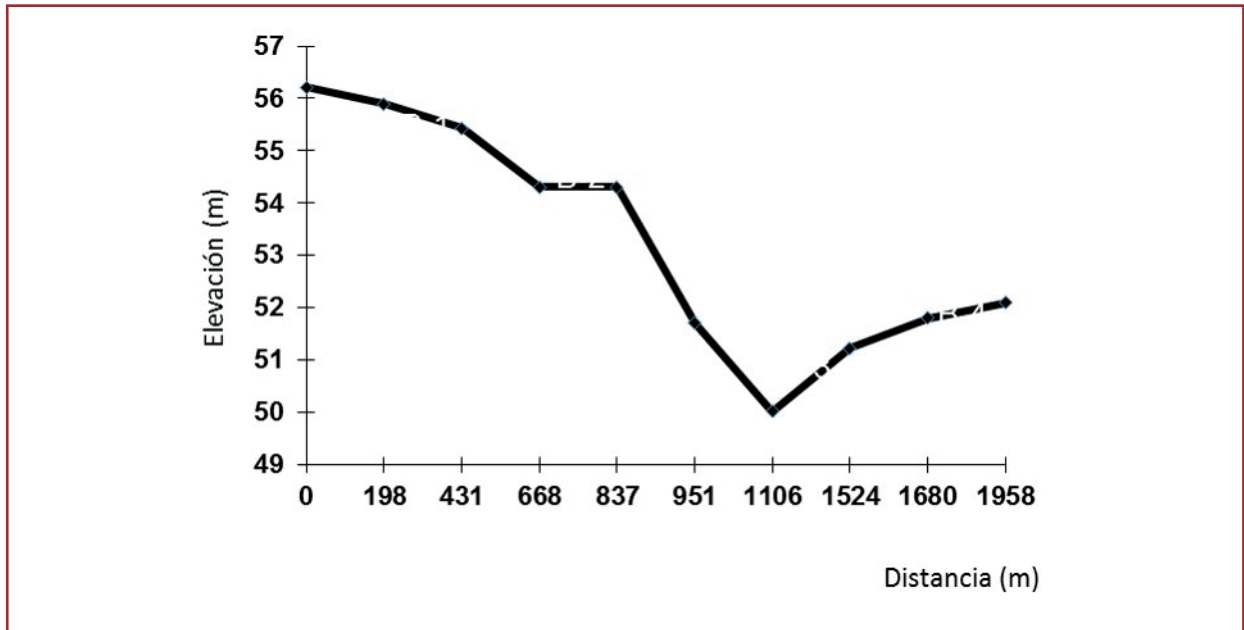
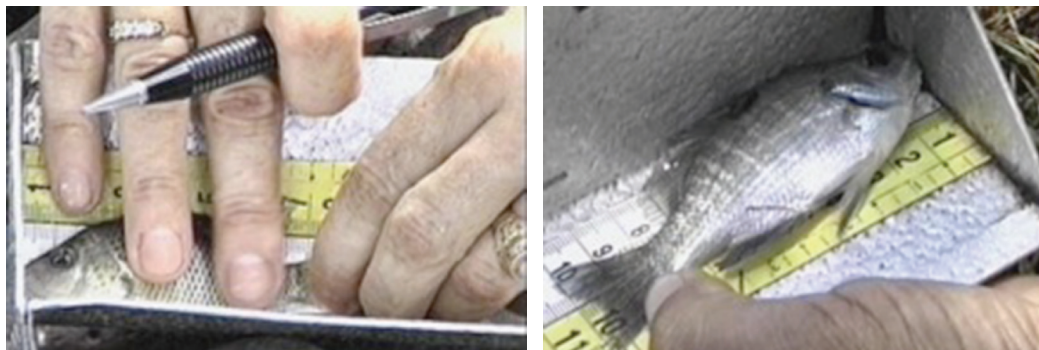


Figura 4.7.2.2. Perfil longitudinal del río Santiago en el tramo de estudio (modificada de García *et al.*, 1999).



4.7.2.2. Químicos y biológicos

La captura de los peces y la evaluación de los parámetros fisicoquímicos consideraron la heterogeneidad ambiental (profundidad y calidad del agua, tipo de sustrato, velocidad media de la corriente y cobertura vegetal), como se describe en el capítulo anterior.⁴²

Se utilizó a la especie *Dorosoma smithii* por su mayor abundancia y requerimientos de oxígeno, velocidad de la corriente y tipo de alimentación. Se analizó el peso, longitud, estadios de desarrollo

y hábitos alimentarios siguiendo los criterios de Schreck y Moyle (1990), específicamente los relacionados con la evaluación del contenido estomacal con el método numérico de Wootton (1990), que consiste en identificar los diferentes tipos de alimentos encontrados en el tracto digestivo de cada espécimen para expresarlos en porcentaje del total. Los resultados corresponden al análisis de cincuenta a cien individuos clasificados en juveniles y adultos. Para establecer la talla de reclutamiento reproductivo, se caracterizó el ciclo de madurez gonádica de la especie, siguiendo la escala de Nikolski.^{41, 44, 61}



Dorosoma smithii



Varias especies del río Santiago.

4.7.2.3. Simulación del hábitat (*Software Physical Habitat Simulation System, PHABSIM*)

El *software PHABSIM* con la metodología IFIM presenta cuatro componentes:

- a) Ingreso de datos hidráulicos, recolectados transversalmente en cada sección del tramo dividido en celdas verticales.
- b) Simulación hidráulica. El *software* simula en cada celda las variables profundidad y velocidad del agua, y el coeficiente de rugosidad, para una serie de caudales, mediante técnicas estándar de modelación desarrolladas por el US Bureau of Reclamation (programa *WSP*), y por el US Army Corps of Engineers (programa *HEC2*). Para el sustrato y la cobertura se emplean valores medidos, no simulados.
- c) Trazado de las curvas de preferencia de hábitat. El *PHABSIM* incluye un módulo para reconstruir las relaciones funcionales entre la profundidad y la velocidad, y obtiene los índices de

preferencia utilizados para calcular las curvas de hábitat y área ponderada utilizable (*Weighted Usable Area, WUA*) con cada caudal (Figura 4.7.2.3).

- d) Modelación de la preferencia de hábitat. Los programas suponen que las condiciones de profundidad, velocidad e índice de preferencia dentro de una celda establecen el valor del hábitat en la misma; o que las condiciones en la celda más la velocidad en las otras celdas en un sitio cercano a ella establecen el valor del hábitat en dicha celda. Asimismo, los programas de simulación hidráulica en el *PHABSIM* suponen que la forma del canal no cambia con la variación del caudal, siempre y cuando el cambio en los caudales se encuentre dentro del rango de simulación considerado.^{13, 50, 64}

Los resultados de los cálculos hidráulicos corresponden a los niveles de la superficie del agua, o espejo, y las velocidades. En los programas de hábitat se calculan los tirantes a partir de los niveles de la superficie del agua simulados en los programas hidráulicos. El nivel de la superficie del agua es unidimensional, debido a que se emplea el mismo valor para

cualquier punto en la sección transversal. En contraste, la velocidad varía de celda en celda. Los modelos hidráulicos suponen

que las alturas del espejo son efectivamente independientes de la distribución de la velocidad en el canal.^{13, 50, 64}

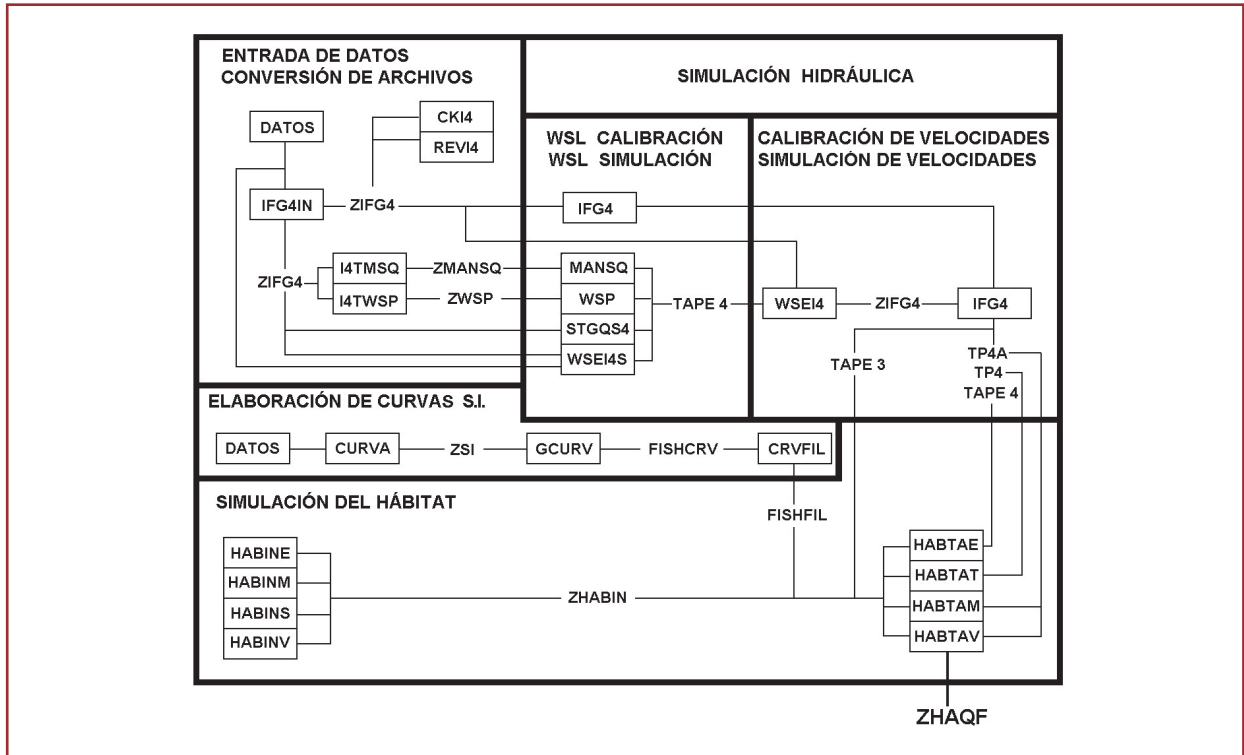


Figura 4.7.2.3. Diagrama de flujo de la información en el sistema PHABSIM (García *et al.*, 1999).

Las técnicas del *PHABSIM* para calcular la altura del espejo, son: las relaciones alturas-caudales, la ecuación de Manning y el método del Paso Siguiendo. La aplicación usual del *PHABSIM* requiere, cuando menos,

un juego de alturas de la superficie del agua para calibrar el modelo en uso. En muchas situaciones, se recomienda una mezcla de modelos para determinar la altura de la superficie del agua.^{13, 50, 64}



4.7.2.4.Descripción de los principales programas hidráulicos incluidos en el PHABSIM

WSP.- Desarrollado por el US Bureau of Reclamation de los EUA,^{13, 50, 64} calcula el perfil de elevaciones de la superficie del agua (*Elevations-Water Surface Profile Program*). El WSP emplea el método del Paso Siguiete para determinar la altura del espejo, suponiendo que cada sección transversal está ligada a las demás. El modelo se calibra ajustando el coeficiente de rugosidad de Manning introducido en el archivo de datos. Cuando el archivo incluye más de dos secciones transversales, debe repetirse el proceso escalando río arriba, de aquí el término *del paso siguiente*. Este proceso efectúa los balances de caudales (masas) y energía entre las secciones transversales. El programa da buenos resultados en remansos (pozas). Las velocidades se simulan en las verticales de las celdas, usando los valores de rugosidad de celda y los factores de conducción. El archivo de salida generado por el WSP, se utiliza solamente en los programas de simulación de hábitats HABTAE/HABTAT.

MANSQ.- Este programa calcula la elevación de la superficie libre del agua para cada sección transversal mediante la ecuación de Manning. El n de Manning sirve como control de la relación altura del espejo-velocidades: las velocidades calculadas se utilizan en el modelo de preferencia de hábitat, cuando las mediciones de velocidad requeridas para calibrar el IFG4 no estuvieran disponibles. Se calibra con un juego de alturas de espejo y debe calcularse una sola velocidad media para toda la sección transversal, no una velocidad para cada celda. Para el MANSQ, cada sección transversal es independiente de todas las demás. Es aplicable en rápidos (secciones del río con mayor velocidad de la corriente) de poca profundidad, sin efecto de remanso.^{13, 63, 64}

Velocidades.- Las velocidades se calculan en el eje vertical de cada celda y se promedian con la velocidad en la vertical situada a la derecha para obtener el archivo final, que será empleado por los programas de simulación de hábitats HABTAE/HABTAT.^{13, 64}

IFG4.- En el sistema PHABSIM se debe emplear principalmente el IFG4 para calcular las velocidades, después de determinar las alturas del espejo de agua con el WSP.

Alturas.- El IFG4 emplea una relación alturas-caudales (curva de calibración) para calcular la altura de espejo en cada vertical, a menos que estas alturas se proporcionen en los datos de entrada. Tanto en la relación altura-caudal, como en las simulaciones, cada sección transversal es independiente de todas las demás. Se pueden emplear las alturas de espejo de cualquiera de los otros modelos cuando la curva de calibración produce resultados erróneos en el IFG4.^{13, 50, 64}

Velocidades.- Las velocidades se determinan por medio de la ecuación de Manning. El programa se calibra con un juego de velocidades medidas. La práctica recomendada es usar un juego, aunque se puede emplear el programa cuando hay múltiples mediciones de velocidades, o bien, cuando no hay mediciones disponibles. El IFG4 se emplea principalmente para calcular las velocidades medias en cada celda y para los caudales no aforados. La velocidad se mide y se simula en las verticales de la coordenada X. Asimismo, se promedian con la vertical de la derecha para obtener el archivo a emplear en los modelos HABTAE/HABTAT. En el IFG4, el coeficiente n de Manning funciona como un control de la velocidad (factor de distribución de velocidades).^{13, 50, 64}

HEC2.- Este programa no es parte del *PHABSIM*, pero se emplea para determinar el nivel de la superficie del agua mediante el método del Paso Siguiete, al igual que el *WSP*. El autor de este programa es el Hydrologic Engineering Center, del US Army Corps of Engineers.

4.7.2.5. Cálculo de la altura de espejo de agua

Las técnicas empleadas para simular las alturas de espejo son: una ecuación empírica altura-caudal basada en datos reales (con el programa *IFG4*), la ecuación de Manning (con el *MANSQ*) y la determinación de la energía perdida entre secciones transversales con la ecuación de Manning. El cálculo de las alturas de espejo, con el método del Paso Siguiete para determinar el perfil de la superficie del agua con el *WSP*. Este método es el que recomiendan los autores del *PHABSIM*,^{13, 50, 64} debido a que es el más preciso para un amplio rango de caudales y a que todas las secciones transversales están ligadas.

La ecuación de Manning supone que el canal controla la altura del espejo. En muchos ríos la altura del espejo es controlada, en las secciones transversales, por bordes de rocas y rápidos formados de piedras, barras de grava y estrechamientos en el canal. En muchos casos existe un control compuesto: 1) control por secciones durante caudales bajos, y 2) control por canal con caudales mayores. Para calcular la altura del espejo cuando se tiene un control compuesto se emplea la relación altura-caudal mediante el programa *IFG4*, a caudales bajos, y el *MANSQ* para caudales mayores. Los cálculos basados en el método del Paso Siguiete determinan las alturas del espejo en las secciones transversales, donde las condiciones hidrológicas controlan un cierto tramo aguas abajo. Los cálculos se basan en la ecuación de Manning para determinar la pérdida de energía

entre las secciones. En secciones con remanso, se recomienda el uso del *WSP* para simular la altura del espejo. El *IFG4* es un programa fácil de usar y el preferido de muchos consultores de los EUA. La relación altura-caudal requiere, al menos, tres pares de valores altura-caudal de la superficie libre del agua para ser válida. Diferentes condiciones en una sección transversal pueden invalidar la relación estrictamente lineal, incluyendo las condiciones de zonas de inundación, obstrucciones importantes a caudales altos, configuraciones complejas del canal y efectos de remanso de un control hidráulico situado aguas abajo.^{13, 50, 64}

En el *PHABSIM* se pueden usar tanto el *IFG4* como el *STGQS4* para obtener la relación caudal-elevación en una sección transversal. El *STGQS4* usa los mismos procedimientos de cálculo que el *IFG4* y transfiere las predicciones de la relación altura-caudal a las líneas de datos *WSL*, del archivo *IFG4* para su uso en las simulaciones del *WSP* o del *MANSQ*. La relación básica está representada por la ecuación:

$$WSL - SZF = a Q^b \quad (6)$$

Donde:

WSL = nivel del espejo

SZF = elevación de la superficie del agua a caudal cero

Q = caudal

a y *b* = coeficientes de regresión

La transformación logarítmica de esta ecuación da como resultado una función lineal de la forma:

$$\log(WSL - SZF) = \log(a) + b \log Q \quad (7)$$

Donde el nivel del espejo se ajustó con la altura a caudal cero (SZF, por sus siglas en inglés). En una sección transversal, con dos o más mediciones de la relación altura-caudal, la ecuación anterior se resuelve para los coeficientes a y b , que posteriormente sirve como base para hacer la predicción de la altura para cualquier caudal dado.^{13, 50, 64}

4.7.2.6. Programa MANSQ

El programa MANSQ emplea la ecuación de Manning para calcular el nivel del espejo en una sección transversal dada. Este programa requiere de un grupo de pares de datos altura-caudal para calibrar el modelo para cada sección transversal. Se supone que cada sección transversal es independiente.^{13, 50, 64}

La ecuación de Manning puede escribirse como sigue (en unidades inglesas o en el SI):

$$Q = \left(\frac{1.49}{n} S^{1/2} \right) AR^{2/3} \quad (8)$$

Donde:

Q = caudal total en la sección transversal

n_i = número de Manning

R = radio hidráulico de la celda

i = profundidad de la celda i

A = área

S = pendiente de energía en la sección transversal

En la mayoría de las aplicaciones del MANSQ hay dos incógnitas: la rugosidad, n , y la pen-

diente de la línea de energía, S , que se pueden agrupar mediante el parámetro de transporte (K), definido con la fórmula

$$Q = KAR^{2/3} \quad (9)$$

y el valor de $K = [(1.49/n) S^{1/2}]$, se obtiene a partir de un juego de pares de valores altura-caudal. El programa también emplea la K calculada a partir de una K de calibración y un coeficiente, mediante las siguientes ecuaciones:

$$K = K_o (Q / Q_o)^\beta \quad (10)$$

$$K = K_o (R / R_o)^\beta \quad (11)$$

Donde: el subíndice o se refiere a los valores de calibración y las β son los coeficientes proporcionados por el usuario.^{13, 50, 64}

La calibración del programa MANSQ involucra un procedimiento de prueba y error para seleccionar un valor que minimice el error entre los niveles predichos y los observados para cada sección transversal. El factor de conducción de canal (CFAC) del programa REVI4 es una excelente estimación inicial de los valores razonables que varían de 0.0 a 0.5, con un valor medio de 0.22. Si hay más de un grupo de pares de valores altura-caudal disponibles, se puede determinar el valor de β como parte de la calibración del modelo. Debido a que el programa MANSQ calcula la velocidad promedio en el canal, no debe usarse para simular las velocidades de cada celda.^{13, 50, 64}

4.7.2.7. Programa WSP

El modelo WSP se calibra por medio de ajustes en el coeficiente de rugosidad de la ecuación de Manning. En el caso de tener rugosidad variable de

un lado al otro de la sección transversal, se utiliza la ecuación de Manning de la siguiente manera:

$$Q = \sum_{i=1}^{n_{cell}} \frac{1.49}{n_i} S^{1/2} AR^{2/3} \quad (12)$$

Donde:

Q = caudal total en la sección transversal

n_{cell} = número total de celdas verticales en las que se dividió la sección transversal

n_i = rugosidad en la celda i

R_i = radio hidráulico de la celda

i = profundidad de la celda i

A_i = área de la celda i

S = pendiente de energía en la sección transversal

La rugosidad varía en función del caudal. El modelo WSP permite el cálculo del cambio en la rugosidad en función del caudal, por medio de multiplicadores de rugosidad. Se usan estos multiplicadores de rugosidad para ajustar la rugosidad en la sección transversal a un caudal dado, con la siguiente ecuación:

$$N_{iq} = n_{ic} M_q \quad (13)$$

Donde:

N_{iq} = rugosidad en la celda i al caudal Q

n_{ic} = rugosidad en la celda i al caudal de aforo

M_q = multiplicador a caudal Q

Podemos reordenar la ecuación de Manning para unificar el producto del radio hidráulico y el área, en una variable independiente:

$$AR^{2/3} = \frac{(Qn)}{(1.49S^{1/2})} \quad (14)$$

Donde:

A = área de la sección transversal

R = radio hidráulico

Q = caudal

n = coeficiente de rugosidad de Manning

S = pendiente

Si suponemos que la rugosidad, n , y la pendiente de energía, S , son constantes para todos los caudales, entonces el radio hidráulico R se puede calcular a partir de los resultados de la calibración del programa WSP. Dada la forma de la sección transversal, se puede calcular el nivel del espejo, porque el término $AR^{2/3}$ es una función únicamente de dicho nivel. Definiendo K como:

$$K = \frac{Q}{AR^{2/3}} = \frac{1.49S^{1/2}}{n} \quad (15)$$

Por lo tanto, si se conoce la relación entre K y Q , se puede calcular el nivel del espejo. También, se puede considerar el valor de M_q como una manera de ajustar la pendiente junto con la rugosidad.^{13, 50, 64}

Fundamentos del programa WSP. Es un programa para calcular el perfil de la superficie

del agua que provee información muy detallada sobre la profundidad y la velocidad, a lo largo de la sección transversal. Este programa se puede usar para predecir la distribución horizontal de las profundidades y la velocidad media de la columna de agua, para un rango de caudales, a partir de un grupo de datos de campo. El objetivo de este tipo de simulación hidráulica es permitir la predicción de la variación de la profundidad, la velocidad y el ancho de cada sección transversal, en relación a una serie de caudales simulados. Se deben cumplir algunas relaciones hidráulicas específicas entre el canal real y el caudal, para evaluar estos cambios en referencia al segmento de canal bajo estudio.^{13, 50, 64}

Estas relaciones se definen por medio de los conceptos de balance de masas (continuidad) y balance de energía. El balance de masa se calcula con la ecuación de continuidad:

$$Q_2 = Q_1 + \Delta Q \quad (16)$$

Donde:

$Q_{1,2}$ = caudal en cada sección transversal, proporcionado por el usuario

ΔQ = cambio en el caudal entre secciones (usualmente cero)

Se calcula la velocidad con la siguiente ecuación:

$$V_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (17)$$

Donde:

V_i = velocidad en la sección transversal i

A_i = área de la sección transversal i

Q_i = caudal en la sección transversal i

Se calcula el balance de energía con:

$$H_2 = H_1 + \Delta H \quad (18)$$

Donde:

$H_{1,2}$ = energía total en cada sección transversal

ΔH = pérdidas totales de energía a medida que el agua se desplaza aguas abajo

El valor de la energía total del flujo en cualquier sección transversal se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli:

$$H = z + d + \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

Donde:

z = nivel del fondo del canal

d = profundidad del agua

$v^2/2g$ = componente de energía debido a la velocidad de flujo (carga de velocidad)

v = la velocidad media de la columna de agua

g = la constante de la gravedad

Entre dos puntos de una corriente, se puede escribir la ecuación de Bernoulli:

$$z_1 + d_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + d_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \text{pérdidas de energía} \quad (20)$$

Esta ecuación muestra los efectos netos de la energía. Los efectos debido a los cambios en el nivel del lecho, profundidad y velocidad se toman en cuenta por medio de las pérdidas acumuladas entre las secciones transversales. Se utiliza una tercera ecuación para relacionar los valores de energía con el caudal, de tal modo que el procedimiento puede verificar los balances de masa y energía. Cuando el usuario define el valor del caudal Q , la rugosidad n , los valores calculados para el área A y el radio hidráulico R , se usa la ecuación de Manning para definir la pendiente de energía, S_{ei} .

$$S_{ei} = \left(\frac{Q_i}{R_i^{2/3} A_i} \frac{n_i}{1.49} \right)^2 \quad (21)$$

Donde:

Q_i = caudal (en pies cúbicos por segundo, *cfs* o en $m^3 s^{-1}$)

n_i = coeficiente de rugosidad

A_i = área de la sección transversal ($pies^2$ o m^3)

R_i = radio hidráulico (en pies o en m); esto es, el área dividida por el perímetro mojado

S_{ei} = la pendiente de energía (los subíndices se refieren a cualquier sección transversal y)

El coeficiente de rugosidad se emplea para expresar cuantitativamente el grado de resistencia al flujo en el canal. El valor de n es un indicador de la rugosidad en las paredes, en el fondo y de otras irregularidades en el perfil del canal; por lo tanto, es un indicador del efecto neto de todos los factores que afectan la circulación del agua. El coeficiente de rugosidad es inversamente proporcional a la velocidad y afecta fuertemente la velocidad calculada por

el programa *WSP*. Para el cálculo del perfil del espejo, se supone que existe flujo permanente durante las mediciones de campo y que la configuración de las secciones transversales permanece constante.^{13, 78}

4.7.2.8. Cálculo de las velocidades

La distribución de velocidades en el canal se calcula empleando la ecuación de Manning. El canal se divide en celdas verticales y se calcula la velocidad para cada una de ellas. Estas velocidades se utilizarán para estimar el hábitat físico de cada celda.

El modelo hidráulico *IFG4* puede usar los datos obtenidos mediante aforos, para predecir las velocidades en las celdas de la sección transversal de una corriente en función del caudal. Se determinan las velocidades con una forma especial de la ecuación de Manning y se calibran con un grupo de velocidades reales. La práctica recomendada más frecuente es usar un juego de datos de velocidades. La principal debilidad del *IFG4* es la dificultad para asignar la rugosidad a las celdas de las orillas, para caudales superiores al caudal aforado más alto; por lo tanto, si es el caso, se deben examinar cuidadosamente las velocidades de estas celdas.^{13, 50, 64}

Calibración y predicción de las velocidades.- En el programa *IFG4* hay una correspondencia de uno-a-uno entre la velocidad media en la celda y la coordenada X de la vertical en la que se midió la velocidad. El programa *IFG4* define una celda como la región que se ilustra en la región oscura de la figura superior de la Figura 4.7.2.4. Una vertical es un punto de medición a una distancia X de un punto de referencia. Nótese que la definición de una celda de la sección transversal en el *IFG4* difiere de la

usada por el programa de modelación de hábitat HABTAE. No obstante, el programa IFG4 automáticamente pasa la información de los

niveles de espejo y de la profundidad simulada a los programas de hábitat con el formato apropiado.^{13, 50, 64}

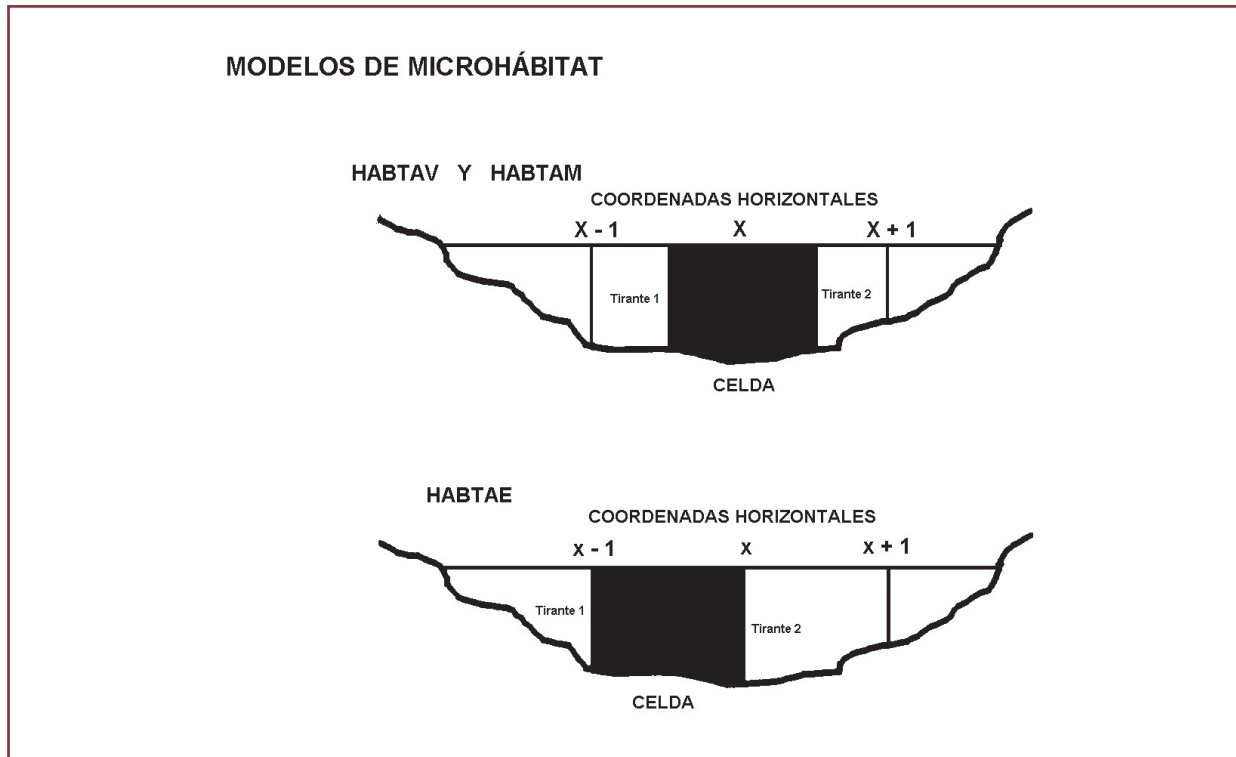


Figura 4.7.2.4. División del tramo de estudio en celdas para el cálculo de la profundidad, altura del espejo de agua y velocidad de la corriente (Milhouse *et al.*, 1989).

El programa IFG4 con un grupo de datos de velocidad-. Este es el caso recomendado por los autores del sistema, aunque no significa que no se recomiende hacer mediciones a más de un caudal. La mínima cantidad de información necesaria para obtener una serie de profundidades y velocidades en un sitio de estudio; es un juego de aforos.^{13, 50, 64}

Si se emplea un grupo de velocidades para calibrar el programa IFG4, se usa un enfoque específico para resolver la ecuación de Manning para el factor n de rugosidad en cada vertical, a lo largo de la sección transversal. Es mucho

mejor si tiene un solo grupo de aforos que se tomen a un caudal alto, ya que los errores de extrapolación se modifican a medida que se simulan caudales inferiores a los aforados, pero se incrementan cuando se simulan caudales mayores.⁷⁶ En vista de que la pendiente S_e , la elevación del espejo y la velocidad observada son parte de los datos de calibración, el cálculo se efectúa con la ecuación de Manning escrita en términos de n_i como incógnita, para cada una de las verticales:

$$n_i = \frac{(1.49 S_e^{1/2} d_i^{2/3})}{v_i} \quad (22)$$

Donde:

n_i = valor estimado del n de Manning en la vertical i

S_e = pendiente de energía para la sección transversal

d_i = profundidad en la vertical i

v_i = velocidad en la vertical

Adviértase que en esta ecuación se ha sustituido el radio hidráulico por la profundidad d_i , de la vertical, y es la diferencia entre el nivel de espejo especificado y el nivel del lecho en cada vertical. Si no se proporciona una pendiente, se usa una pendiente por omisión, de 0.0025. La velocidad real o medida V_i , para cada vertical, se obtiene de los datos introducidos al sistema. Después de obtener los valores individuales de n de Manning para cada vertical, se pueden calcular las velocidades para cada celda, a diferentes caudales, con la ecuación:

$$v_i = \left(\frac{1.49}{n_i} \right) d_i^{2/3} S_e^{1/2} \quad (23)$$

4.7.2.9. Procedimiento de cálculo y balance de masas

El área de la celda se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_i = \frac{1}{4} [(d_i + d_{(i-1)})(X_i - X_{(i-1)})] + \frac{1}{4} [(d_{(i+1)} + d_i)(X_{(i+1)} - X_i)] \quad (24)$$

Donde:

A_i = área de la celda i

X_i = distancia horizontal a lo ancho de la sección transversal hasta el punto i

d_i = la profundidad en la vertical i

El caudal calculado para la sección transversal, se determina por medio de las dos ecuaciones previas: se calcula la velocidad y el área en cada celda, y se suman los caudales individuales para toda la sección transversal:

$$Q_{prueba} = \sum_{i=1}^{ncell} A_i v_i \quad (25)$$

El balance de masas se obtiene por medio del cálculo del factor de ajuste a la velocidad (VAF), tal que el caudal estimado para la sección transversal se iguala al caudal simulado. El VAF se calcula con la siguiente ecuación para un nivel de la superficie libre del agua (WSL) fijo para los dos Q :

$$VAF = \frac{Q_{simulado}}{Q_{calculado}} \quad (26)$$

Posteriormente, se usa esta proporción para ajustar las velocidades en cada celda, V_i , y así lograr el balance de masas para los caudales simulados, con la ecuación:

$$V_i = V_i VAF \quad (27)$$

Este ajuste en las velocidades se efectúa de la misma manera dentro del programa *WSP*. Para mayores detalles sobre los modelos hidráulicos que emplea el *PHABSIM*; refiérase al *Information Paper 26*.^{13, 50, 64}

4.7.2.10. Modelos de hábitat en el *PHABSIM*

En el *software PHABSIM* hay dos tipos de modelación del hábitat que se basan en: 1) las condiciones globales del cauce del río (macrohábitat), o 2) la distribución de velocidades y profundidades en las celdas, medidas en campo (y, por lo tanto, celdas de cálculo), y las características del canal (microhábitat).^{13, 50, 64}

Modelos de macrohábitat.- Los modelos de parámetros promedio, AVDEPTH y AVPERM, calculan el ancho de la sección mojada a un caudal dado y la altura del espejo de agua dados por el usuario. También, se determinan el ancho de la sección mojada de un río para el tirante especificado por el usuario, y la velocidad promedio. El programa HABVD contiene un procedimiento breve para modelar un macrohábitat, tomando como base los datos que habitualmente recopila el US Geological Survey, y la lógica y los conceptos del programa HABTAE. Los modelos basados en condiciones promedio generalmente no se emplean, debido a su poca utilidad.^{13, 50, 64}

Modelos de microhábitat.- El programa HABTAE supone que las condiciones dentro de la celda establecen el valor de hábitat de la misma. En contraste, en los programas HABTAV y HABTAM, las condiciones en una celda y la velocidad en otras celdas o en otro sitio cercano a la misma establecen el valor de hábitat en la primera. Estos modelos que emplean parámetros distribuidos son el HABTAE, el HABTAV y el HABTAM.^{13, 50, 64}

Al terminar de aplicar el modelo hidráulico apropiado para determinar las características de la corriente (profundidad y velocidad en función del caudal), el paso siguiente es integrar esta información y las curvas de preferencia de hábitat para obtener una medida del hábitat disponible para ciertos caudales. La Figura 4.7.2.5 ilustra la representación básica de la información de la sección transversal de un canal, que define una malla de celdas de hábitat con sus atributos asociados relativos a profundidad, velocidad e índice de canal (substrato y cobertura).^{13, 50, 64} La estimación más común del potencial de hábitat es la que se obtiene mediante la combinación

de la cantidad de hábitat (área utilizable) y su calidad (ponderación), conocida como el área ponderada utilizable (*Weighted Useable Area*, WUA). El hábitat ponderado es el marco de referencia para la evaluación de un proyecto y la negociación del caudal que se dejará circular en el cauce. WUA es:

$$WUA = \sum_{i=1}^{ncell} (H_j S_{jk}) \frac{A_i}{L} \quad (28)$$

Donde:

A_i = área superficial de la celda i

S_{jk} = el valor de la curva S_{ij} para la fase vital k

i = el índice de celda, que va de 1 a n

j = el índice de la característica S_i

L = la longitud del tramo en múltiplos de 1 000 pies o 1 000 m

4.7.2.11. Supuestos de los modelos de hábitat

- En una corriente fluvial los individuos seleccionan las condiciones ambientales más cercanas a las óptimas y utilizan con menos prioridad las áreas menos favorables.
- Las condiciones más favorables pueden representarse por curvas de preferencia de hábitat.
- Se pueden evaluar los índices de preferencia para cada celda independientemente.
- El área ponderada total de hábitat disponible en cada celda es indicativa de las condiciones del hábitat total de un caudal específico. Dicha área ponderada

utilizable es la suma aritmética del área ponderada de todas las celdas para un caudal específico.

- El hábitat físico es el que limita el tamaño de la población y no la calidad del agua u otros factores.
- Las características físicas del hábitat en la corriente (profundidad, velocidad, sustrato, cobertura) puede ser representada (ponderada) en un grupo de celdas rectangulares con las condiciones en las fronteras o centroides de las celdas.
- Las condiciones de la selección con respecto a los componentes individuales del hábitat físico pueden

ser representadas (ponderadas) por un *índice de preferencia* con valores desde 1.0 (hábitat óptimo) hasta 0.0 (hábitat no-habitable o inhóspito).

- Se puede evaluar para cada celda el *área ponderada útil*, al multiplicar su área por su índice de preferencia.
- Se puede calcular matemáticamente un *índice de preferencia compuesto* significativo de una combinación de varios índices de preferencia.
- Se pueden sumar los valores individuales de las celdas para formar un *área ponderada útil total*, que es una medida representativa del hábitat global de la corriente.^{13, 50, 64}

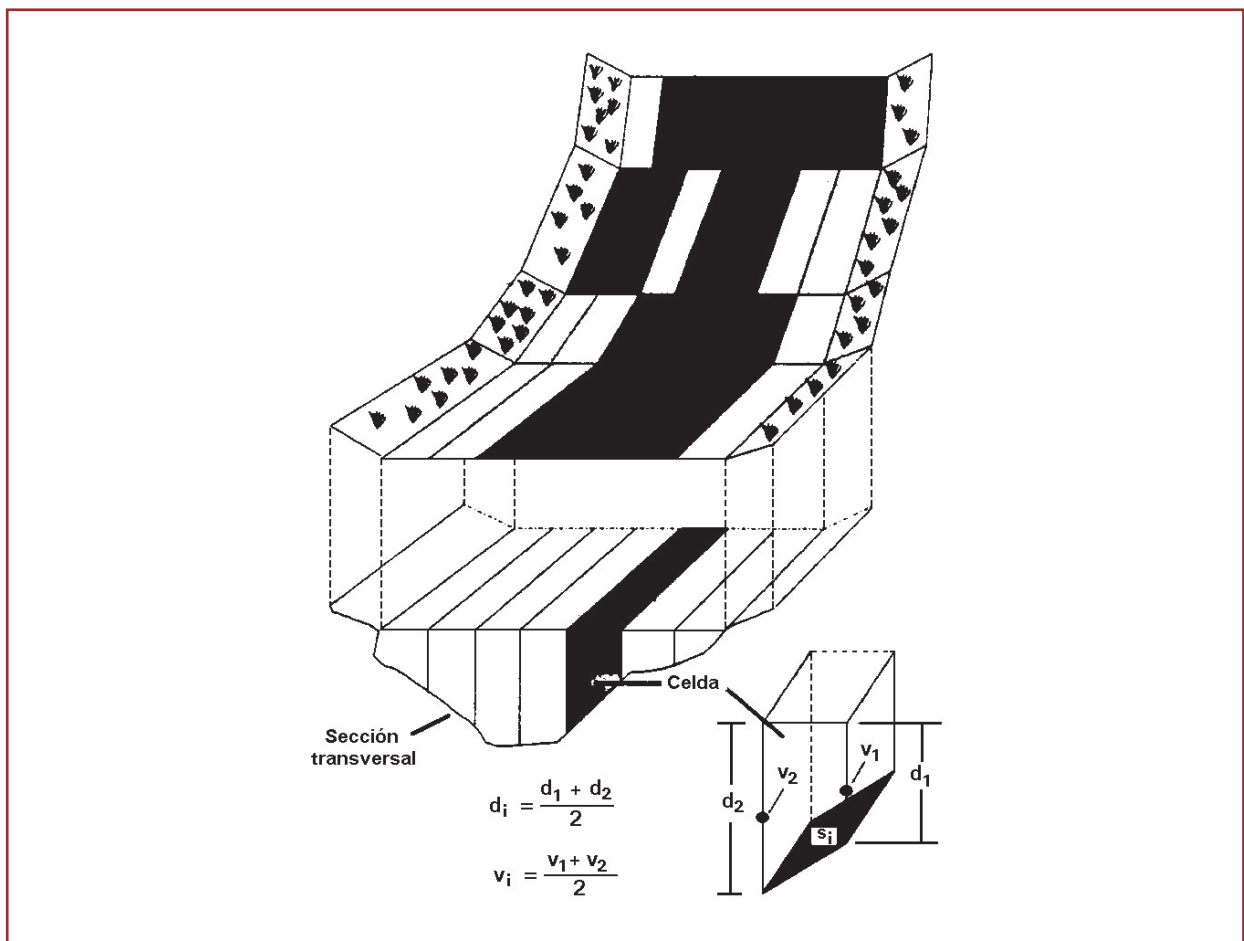


Figura 4.7.2.5. Representación esquemática de las secciones transversales que definen una malla de celdas de hábitat en un canal (García *et al.*, 1999).

4.7.2.12. Técnicas para la obtención de índices de preferencia

Se determinan los índices de preferencia de las especies de la celda para la profundidad, velocidad y el índice de canal. Se ilustra este proceso en la Figura 4.7.2.6. El usuario tiene la opción de elegir entre varias ecuaciones para los diferentes índices en uno solo de preferencia compuesta (CSI) para la celda. Se puede emplear la agregación multiplicativa y se determina con:

$$C_i = V_i * D_i * S_i \quad (29)$$

Donde:

C_i = el índice de preferencia compuesta de la celda i

V_i = la preferencia asociada con la velocidad simulada en la celda i

D_i = la preferencia asociada con la profundidad simulada en la celda i

S_i = la preferencia asociada con el índice de canal en la celda

El cálculo de las curvas de preferencia, mediante la frecuencia relativa de utilización y disponibilidad para un criterio de preferencia de hábitat normalizado, se introdujo por Gose (en Hardy *et al.*, 1997), en la investigación de los caudales fluviales (concepto de límites de tolerancia no paramétrica en las curvas de utilización del hábitat para las especies). Estos límites que se encuentran establecidos por pares de números en Tablas (Somerville, en *IFIM Boletín Report*, 1986), según sea el tamaño de la muestra. Sus valores definen los límites para los cuales una proporción dada de la población

estará entre un cierto valor de probabilidad por debajo de la media para una variable dada (profundidad) y otro valor mayor al promedio de la variable considerada, y a un dado nivel de confianza.^{13, 50, 64}

Al factor de peso normalizado de 1.0 se le asigna el 50% de las observaciones; para un valor de 0.5 el 75% de las observaciones realizadas; para 0.1 el 90% y para 0.05 un 95% de las observaciones. Como los valores de peso 0.1 y 0.05 son inconsistentes con los pesos para ciertos rangos (50 o 75%) se debe efectuar la división de la curva de utilización y disponibilidad en intervalos representando la distribución teórica de la población. El intervalo más fácil de identificar corresponde a la proporción de la curva de utilización y disponibilidad con un índice de adecuación o disponibilidad de uno, que por definición corresponde al 50% de la población dentro de un rango de velocidad de corriente o profundidad x (promedio de la frecuencia relativa).^{13, 50, 64}

El número de intervalos puede variar, dependiendo del rango y ancho de la clase (generalmente de 1 cm s^{-1}). O sea, se calculan las frecuencias esperadas para cada intervalo utilizando la precisión especificada arriba. Se supone que la frecuencia relativa esperada para cada intervalo es el promedio del bloque entero (porcentaje total de la población dentro del bloque dividido por el número de intervalos). Estas frecuencias relativas esperadas son arregladas por intervalos, a través de los rangos de utilización de la variable para disponibilidad y utilización de la especie. La tasa de preferencia para cada intervalo es analizada, normalizada y se grafica el índice de preferencia en puntos intermedios de los intervalos de clase.

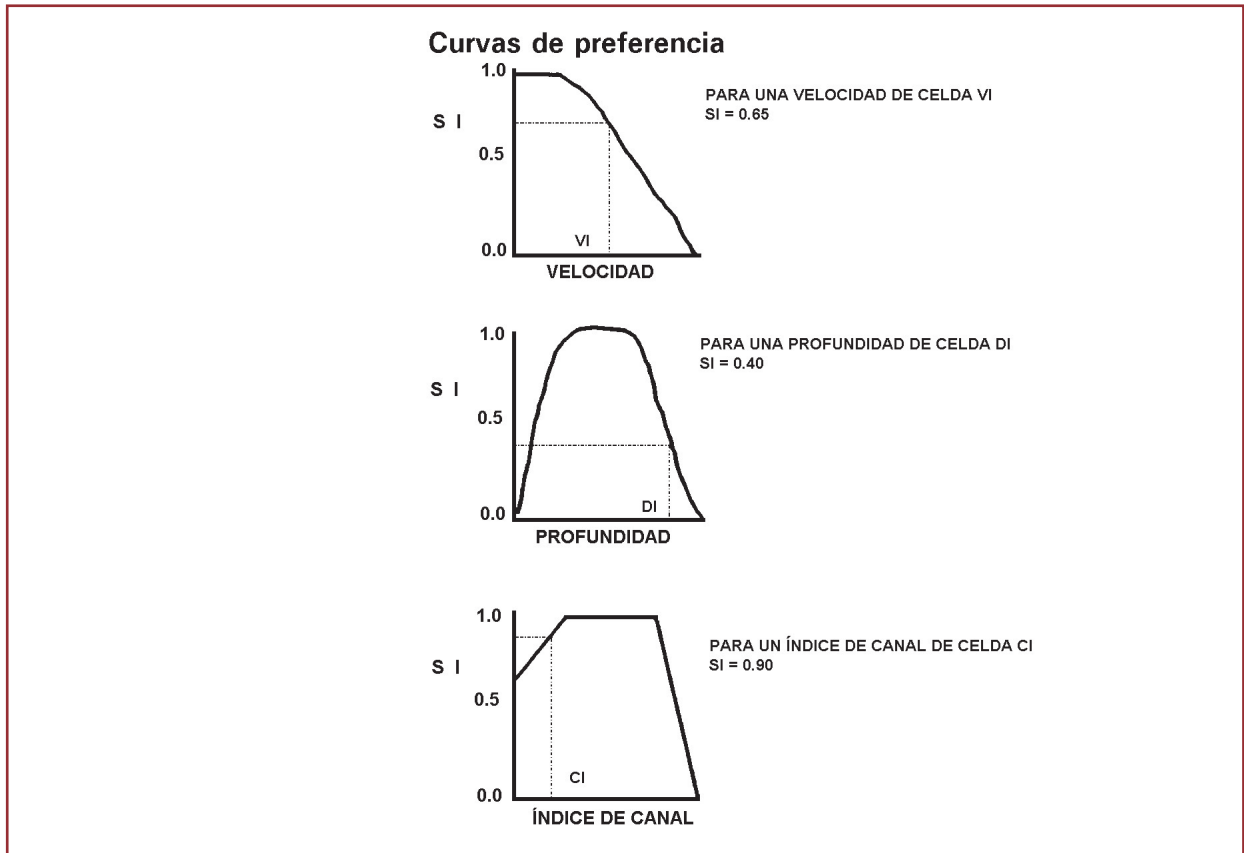


Figura 4.7.2.6. Índices de preferencia (SI) obtenidos para alimentar el software *PHABSIM* (García *et al.*, 1999).

La versión *PHABSIM* utilizada en este estudio fue la 2 (DOS) y actualmente existe la versión *PHABSIM* para *Windows*. Las principales diferencias radican en que actualmente se utiliza el sistema *Windows* para la ejecución de una serie de programas interface y desarrollo de análisis gráficos, aspecto que hace más amable el manejo de los archivos, ya que cada sitio de estudio es mantenido por separado a través de un directorio del proyecto, reduciendo el riesgo de confundir los archivos.^{13, 41, 50, 64}

En la nueva versión las distintas definiciones para los programas *HABTAE* y *HABTAV* han desaparecido y todas las opciones de *HABTAV*

se incluyen en *HABTAE*. El número limitado de cien celdas por cada sección cruzada ha sido eliminado, teniéndose en este nuevo ambiente un número ilimitado de celdas para definir cada sección. Otra diferencia consiste en la consolidación de los programas *AVDEPTH* y *AVPERM* en uno solo.^{13, 49, 63} Con estas diferencias en el desarrollo de los procedimientos analíticos, algunos de los resultados pueden presentar variaciones entre 2 y 10% en los WUA (las áreas ponderadas utilizables), en el nivel de la superficie del agua, en la profundidad, en el índice de adecuación de la profundidad y en el índice de adecuación combinado.^{13, 50, 64}



Río Santiago, Nayarit.

4.7.3 RESULTADOS

Se capturaron 287 individuos de la especie *Dorosoma smithii*, con una talla promedio de 7.1cm, con una preferencia por corrientes de 15 a 26.5 cm s⁻¹, profundidades medias de 1.35 m a 2.6 m, sustrato con grava y sitios soleados con poca o ninguna vegetación sumergida, según los análisis de la preferencia de hábitat a través de las curvas de abundancia y análisis multivariados. Es una especie detritívora asociada con aguas de mediana profundidad, zonas arenosas con grava y corrientes rápidas, debido a que requiere agua oxigenada con materia orgánica en suspensión. Es una especie anfídroma secundaria que aparece frecuentemente en esta parte del río, indicando que su ciclo biológico se encuentra

adaptado a las variaciones de la corriente (Figura 4.7.2.7).^{42, 46}

La adecuación del hábitat en *D. smithii* se estimó a través de las curvas de preferencia para la profundidad y velocidad de la corriente. Señala que la superficie potencialmente utilizable del río aumenta cuando el flujo se incrementa, con una tendencia asintótica a los 350 m³ s⁻¹, como lo muestra la gráfica de área superficial total vs. caudal (Figura 4.2.7.8).

La gráfica de hábitat vs. caudal representa la suma total de áreas ponderadas utilizables del río (para los caudales que van de 0 y 300 m³ s⁻¹, y establece la relación entre el caudal y el hábitat disponible en el tramo de río (Figura 4.7.2.9).



Figura 4.7.2.7. *Dorosoma smithii* (García *et al.*, 1999).



Río Santiago y llanura de inundación.

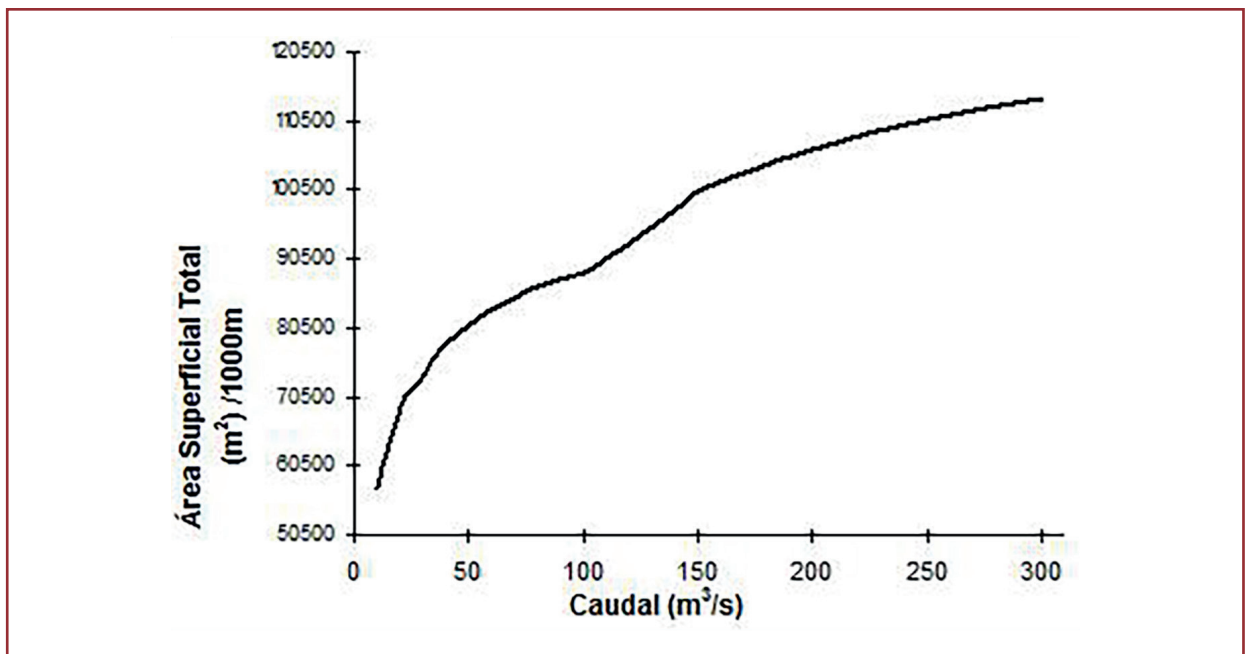


Figura 4.7.2.8. Área total superficial potencialmente utilizable vs. caudal en el río Santiago (modificada de García *et al.*, 1999).

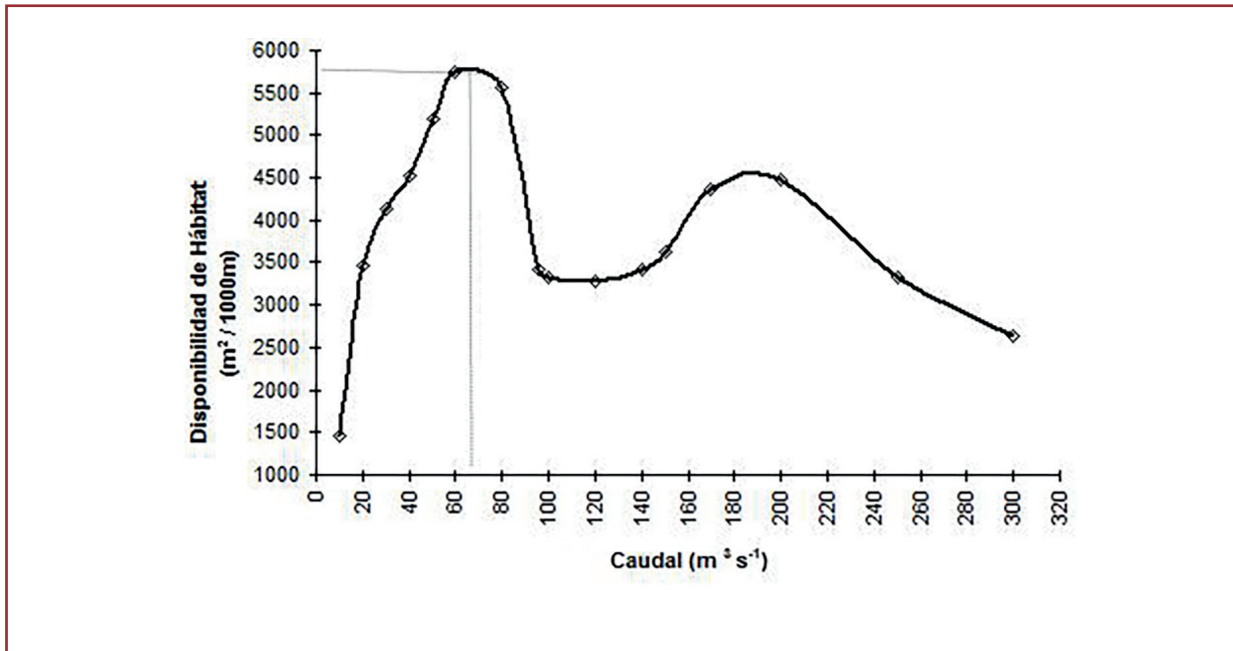


Figura 4.7.2.9. Adecuación del hábitat vs. caudal en el río Santiago (modificada de García *et al.*, 1999).

La gráfica muestra un incremento continuo en la disponibilidad del hábitat con un primer máximo óptimo de 5 800 m² por cada 1 000 m de río, o área adecuada para el desarrollo de la especie cuando el flujo es de 64 m³ s⁻¹, comportamiento asociado con el llenado del canal principal del río (Tabla 4.7.2.1). Un segundo pico de menor magnitud de 4 500 m² por cada 1 000 m de río señala la generación de un

hábitat idóneo para *D. smithii* cuando el flujo es de 185 m³ s⁻¹, que puede ser asociado con el llenado de la llanura de inundación. Después de este segundo pico, la curva sigue decreciendo, indicando que las áreas con un hábitat adecuado para el desarrollo de los peces decrece cuando el flujo crece debido a las fuertes corrientes, que provocan la remoción de sedimentos y materia orgánica.

Tabla 4.7.2.1. Estrategia para el manejo de los caudales en la presa Aguamilpa.

Época	Caudal (m ³ s ⁻¹)	Patrón	Importancia
Secas (marzo-abril)	40	Mínimo indispensable	Recurso escaso
Posregulación	64	Mínimo óptimo	Mantener el hábitat
Lluvias (junio-agosto)	200	Flujos máximos	Preservar la ribera y llanura de inundación
Pico de lluvias (septiembre)	350-500	Vaciado rápido	Conservación morfológica



Río Santiago, Nayarit.

4.7.4 DISCUSIÓN

Aunque el muestreo, el análisis de los datos y la modelación de la preferencia de hábitats para el río Santiago tiene algunas limitaciones por las condiciones hidrológicas reinantes (río de montaña con pendientes pronunciadas y grandes variaciones estacionales que dificultan medir la profundidad y la velocidad a niveles de flujo alto), se observó que el área superficial total ponderada utilizable y el hábitat potencialmente utilizable por los peces son impactados por los caudales extremos. La simulación del hábitat físico y el criterio de adecuación del hábitat para *D. smithii* señalan un rápido incremento en la gráfica de áreas ponderadas utilizables con relación a los caudales cuando el flujo en el río crece de 20 a 64m³ s⁻¹, relación equivalente al

llenado del canal principal del río. Así, como un segundo incremento asintótico entre 150 y 300 m³ s⁻¹ asociado a la llanura de inundación caracterizada por ser relativamente somera y de pendiente pequeña.^{39, 42}

El primer incremento en la curva de hábitat-caudales se asocia con un aumento en la cantidad de nichos en la estación húmeda cuando el río se llena por completo, situación adecuada para la migración de *D. smithii*, en aguas medianamente profundas, con considerable velocidad en la corriente y alimento en constante suspensión. Muchos organismos son sensibles a los cambios en la velocidad de las corrientes. Debido a mecanismos de resuspensión del alimento, este aspecto puede limitar la posibilidad de los organismos para permanecer en un determinado

segmento del río. Algunos también responden a las variaciones temporales de los flujos, ya que el río puede cambiar las condiciones estructurales del canal y favorecer el incremento en la mortalidad, modificando la disponibilidad de recursos y las interacciones entre las especies.^{31, 57, 60, 68, 69, 75, 79, 83} Cuando el flujo es de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se observa un abatimiento (inflexión en la curva) del área habitable, el cual corresponde con el llenado del cauce principal del río y con la pérdida de hábitats. También las altas velocidades de la corriente en la zona central del canal origina el arrastre de los peces, sedimentos y materia orgánica.

Un segundo incremento de menor magnitud en la relación hábitat-caudal (entre 160 y $210 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) fue relacionado con el desbordamiento del río y la generación de una zona de agua somera de baja pendiente, con cubierta vegetal y presencia de vegetación sumergida en las orillas del río o llanura de inundación. Este segundo pico en la gráfica a $185 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ indica el incremento de nuevos nichos o hábitats adecuados para el desarrollo de las diferentes especies de peces en esta zona. La presencia de vegetación en la llanura de inundación cambia el régimen de flujo aguas abajo y representa un factor relacionado con el desplazamiento de las comunidades de peces que huyen de los caudales altos del río en el canal principal. En el río Santiago la inundación favorece el desarrollo de especies debido al incremento en la cantidad de alimento y zonas de refugio, situación observada en otros ecosistemas por Díaz-Pardo *et al.* (1993), MacLed *et al.* (1995), Jungwirth *et al.* (2000) y Arthington (2006).

Por su parte, Jhonson (1997) señala que la vegetación riparia es un factor importante en la atenuación de la irradiación y cambios de temperatura en los ríos. La radiación directa

eleva significativamente la temperatura del agua, principalmente durante el verano. Las llanuras de inundación actúan como áreas de amortiguamiento, al prevenir los cambios drásticos de temperatura, así como en la atenuación de los incrementos de temperatura.^{9, 13, 14, 15, 52, 60} La disminución de la profundidad del río Santiago puede reducir también la depredación intensa de los grandes peces, y por lo mismo estas zonas son utilizadas como áreas de crianza por muchas especies, donde la riqueza específica y diversidad se incrementan. Las zonas de inundación han sido ampliamente reconocidas como hábitats altamente productivos, sobre todo para especies que se encuentran amenazadas o en peligro. Las charcas o pozas proveen de un espacio, abrigo y alimento a los peces durante las tormentas, sequías y otros eventos catastróficos. La migración de muchas especies de peces aguas abajo involucra la utilización de las áreas someras y de pozas para los periodos de descanso de los peces.^{13, 14, 15, 30, 60, 87, 54, 69, 95}

En el río Santiago los periodos de inundación coinciden con los periodos de alta producción, y los peces jóvenes pueden utilizar los periodos de alta abundancia de alimento como ha sido observado en otros ecosistemas.⁴⁴ Ringelman (1991) y Bayley (1995) señalan que el flujo y reflujo de agua en las zonas de inundación incrementan la productividad biológica y favorece la diversidad. Los pulsos anuales en los caudales representan un factor crítico que propicia el desove y la migración de algunas especies. Estas variaciones anuales también son indispensables en el transporte de materia orgánica a la llanura de inundación y para mantener la geometría y diversidad del río.^{8, 10, 13, 14, 15, 18, 26, 30, 37, 62}

El decremento al final de la curva hábitat-caudal ($300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) señala que los peces,

vegetación, sustrato e invertebrados del piso del río son arrastrados aguas abajo por las fuertes corrientes, propiciando la pérdida de hábitats adecuados para la sobrevivencia, alimentación, crianza y refugio. Sin embargo, la variación en los caudales es de mucha importancia porque ejercen una influencia primordial en todos los procesos abióticos y bióticos del río al determinar la estructura y dinámica de los ecosistemas riparios. Los caudales altos también son importantes en el transporte de sedimentos y en la interconexión entre la llanura de inundación y el canal principal.^{8, 10, 31, 56, 62, 95}

La importancia de los grandes caudales en los procesos físicos y biológicos para mantener una interconexión entre el canal y las llanuras de inundación adyacentes ha llegado a ser considerada como un elemento crítico de adecuación ecológica.³⁸ Uno de los aspectos más importantes desde el punto de vista ecológico es que el régimen de flujo en los ríos ejerce una función a largo plazo indispensable también para los corredores ribereños que requieren la protección de los procesos físicos que forman y mantienen al canal.^{7, 8, 38, 59} Asimismo, Schiemer (2000) señala que la calidad ecológica en un río no depende solamente de sus propiedades estructurales, sino también de las interrelaciones entre la geomorfología y la hidrología del río. La fluctuación en el nivel del agua conduce en los ríos a un continuo cambio en la posición de los microhábitats y determinan la disponibilidad, conectividad y calidad de los refugios en cada microhábitat.^{13, 50, 64, 67, 68}

Los caudales artificiales pueden imitar los flujos naturales para los cuales los organismos se encuentran adaptados (acorde con las estaciones de lluvias y secas). Por lo tanto, es necesario cuantificar los caudales ecológicos

mínimos, máximos y óptimos (bajos o altos). El caudal mínimo indispensable (caudal extremo bajo) es útil en la determinación de la disponibilidad de agua para la conservación ecológica y para la evaluación del recurso fuera y dentro del río, así como para la negociación entre usuarios del sistema, elemento esencial en la planeación social, política, y económica del río.^{13, 14, 50, 64, 67, 68, 71, 92, 95}

Estrategia. En el río Santiago pueden ser utilizados los requerimientos de flujo para los peces, calidad del agua y simulación de las curvas de utilización potencial del hábitat que cuantifican los cambios de microhábitat cuando cambia el caudal, para recomendar un régimen de flujo para el manejo de la presa Aguamilpa. Asimismo, las condiciones hidrológicas actuales e históricas deben ser consideradas para establecer el tipo de caudales que deben implementarse en el río Santiago:

- En la época de secas marzo-mayo flujos mínimos indispensables (caudales extremos bajos por corto tiempo) de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sobre todo cuando el recurso es limitado.
- Para un patrón general de caudales posregulación se requiere una descarga promedio mensual estable de $64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, durante los periodos de manejo y regulación como caudal mínimo óptimo (caudales bajos).
- En junio y julio caudales de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la conservación del corredor fluvial (caudales altos).
- En agosto (en el pico de las lluvias) flujos entre $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como caudal máximo para mantener y conservar la estructura del río y la llanura de inundación o pulsos de caudal alto (sobre

todo cuando las condiciones climáticas y la producción hidroeléctrica requiere del vaciado rápido de la presa o pulsos de caudal altos).

- En diferentes épocas del año, los caudales de $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ valorados como pequeñas inundaciones pueden remover sedimentos y vegetación excesiva acumulada en el fondo del canal. Estos caudales son a veces necesarios para la conservación morfológica del río y la zona de inundación, y con la finalidad de mantener también la cubierta vegetal de los corredores fluviales. Sin embargo, este régimen de flujos debe ser implementado de forma flexible, de manera que sea posible efectuar los ajustes necesarios para la adecuada operación del reservorio.

La adaptación y ajuste continuo en los flujos para la operación de las presas es una consideración inicial para la adecuada restauración y regulación fluvial, por lo que Galat y Lipkin (2000) recomiendan un análisis de la respuesta ecológica de las especies para evaluar el régimen de flujo que se aproxime más al régimen de flujo natural. Este criterio puede constituir una herramienta en la selección de alternativas para el manejo de los caudales, en el establecimiento de las negociaciones entre varios grupos de interesados y para informar a los tomadores de decisiones con la finalidad de que se amplíe el criterio a la hora de resolver conflictos entre usuarios.^{13, 14, 50, 64, 67, 68, 71, 92, 95}

El análisis multifactorial del hábitat permite utilizar el conocimiento generado y la experiencia para interpretar todas las posibles opciones de manejo de los caudales en el río Santiago. La importancia de la planeación racional de un régimen de caudales reside en la posibilidad de

predecir y manejar los pulsos de producción de peces tanto en el río como en las zonas de inundación, estrategia que repercutirá en la alta producción en las pesquerías de los grandes ríos.^{10, 71}

En muchos de los casos deben efectuarse análisis adicionales para calcular los caudales que mantienen y reparan el canal y/o modulan la calidad y la temperatura del agua. Igualmente, existen muchos otros tipos de análisis y aproximaciones teóricas que pueden auxiliar en el estudio del manejo de los recursos acuáticos para la toma de decisiones. Sin embargo, la experiencia de los profesionales ecólogos e ingenieros responsables de analizar y reconocer las políticas de manejo indica que tienen que ser ajustados adecuadamente los problemas sociales, políticos y ambientales para no generar conflictos más grandes.^{43, 70}

Conclusiones

Los cambios en el flujo natural y artificial en el manejo de las presas del río Santiago afectaron la adecuación del hábitat y desarrollo de las especies nativas.

En el río Santiago se puede imitar el patrón de régimen natural de caudales para que los organismos involucrados puedan completar sus ciclos de vida, sin ningún riesgo tanto en la época de lluvias como en la de secas. Por lo tanto, es necesario determinar los flujos mínimos necesarios, mínimos óptimos y máximos (caudales extremos bajos, caudales bajos, caudales altos, pulsos de caudal altos, pequeñas inundaciones, etc.) para el manejo económico de la presa y para la conservación de la biodiversidad.

En el río Santiago el área superficial total y las áreas ponderadas utilizables señalaron un patrón

general de caudal posregulación de $64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante la época de manejo y regulación como mínimo óptimo. Durante marzo-mayo, un caudal de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como mínimo permisible por cortos periodos. En junio y julio flujos de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (caudales altos). Para agosto un caudal entre $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como máximo (pulsos de caudal altos) para mantener y conservar la estructura del río, y caudales de $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para mantener la llanura de inundación.

La simulación señaló la necesidad de mantener un flujo mínimo óptimo de $64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para generar un área superficial total utilizable para las especies de $5\,800 \text{ m}^2$ por cada $1\,000 \text{ m}$ en la porción de río analizada. Un área máxima

de $4\,500 \text{ m}^2$ por cada $1\,000 \text{ m}$ como hábitat potencialmente utilizable por las especies en la llanura de inundación, cuando el flujo es de $185 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante la estación de lluvias cuando el río se desborda.

El manejo y regulación de las presas han generado grandes beneficios económicos al reducir los flujos anuales extremos e incrementar la predictibilidad de los caudales durante el año. El valor económico del río Santiago y de otros muchos más se puede incrementar cuando la pesca artesanal, agricultura, manejo de las hidroeléctricas y transportación hayan sido integradas bajo un contexto socioecológico, en beneficio de los regímenes de caudales naturales.



Río Santiago.

4.8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

4.8.1 CASO DE ESTUDIO: RÍO SANTIAGO, NAYARIT

El incremento desmedido en la demanda de agua para cubrir las crecientes necesidades humanas, ha resultado en una problemática compleja entre el uso y explotación de ríos y su conservación como sistema ecológico estable e importante prestador de innumerables servicios ambientales. Técnicamente, implica un reto y enfrenta grandes dificultades desde el punto de vista social, económico y político.^{13, 14, 15, 32}

El caudal ambiental es una alternativa que busca encontrar un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, reconociendo que para

conservar la diversidad, los bienes y servicios ambientales que brindan los sistemas acuáticos, se debe considerar que la variabilidad de los caudales naturales son los que mantienen la salud y resiliencia de tales sistemas. Por ello, las propuestas más modernas de cálculo de caudal ambiental buscan acercarse lo más posible a esta variabilidad.^{1, 2, 17, 43, 56, 74, 75, 95}

4.8.2 RESULTADOS

El método de Tennant modificado para las zonas tropicales de México. Calcula los caudales ecológicos de los registros hidrológicos de por lo menos diez años, en este caso para el río Santiago, tomando en consideración el 20% del caudal promedio anual para la época de estiaje ($37.12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), el 10% para los periodos de extrema sequía ($18.56 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y por cortos periodos, del 30 al 50% para la época de lluvias ($55.67 - 92.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y de 200% para los pulsos de caudal alto ($371.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y pequeñas inundaciones de $1\ 000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Tabla 4.8.1).

Tabla 4.8.1. Propuesta de caudales ecológicos en la presa Aguamilpa, por el método de Tennant modificado para las zonas de México.

Época	Caudal ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Patrón	Importancia
Secas (marzo-abril)	18.56	Mínimo indispensable o caudal extremo bajo	Recurso escaso
Postregulación	37.12	Mínimo óptimo o caudal bajo	Mantener el hábitat
Lluvias (junio-agosto)	55.67-92.8	Flujos máximos o caudal alto	Preservar la ribera y llanura de inundación
Pico de lluvias (septiembre)	371.2	Pulsos de caudal alto	Conservación morfológica
Pequeñas inundaciones	1 000	Vaciado rápido o pequeñas inundaciones	Limpieza y conservación de la zona de inundación

Hidroperiodo (Indicator of Hydrologic Alteration, software IHA). La propuesta para el manejo de la presa Aguamilpa, a través de la aplicación del *software IHA*, se muestra en la Tabla 4.8.2. La estrategia para la conservación del régimen hidrológico requiere un caudal de $25.49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los periodos de máxima sequía, o caudales extremos bajos, para los meses de

abril o mayo con una duración de 15 días. Para los meses de secas (noviembre a mayo), caudales bajos de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para los meses de lluvias (julio a septiembre), un caudal de $697 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; y para este mismo periodo con al menos dos años de retorno, un caudal de $1\,275 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante cinco días, y un caudal de $3\,500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para periodos de retorno de al menos diez años.

Tabla 4.8.2. Propuesta para el manejo de los caudales en la presa Aguamilpa, a través del análisis de indicadores de alteración hidrológica (IHA).

Componentes del caudal ambiental	Estación Capomal (promedios) $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Representación estadística
Flujos extremos bajos (durante 15 días)	25.49	Flujos menores al 10% de todos los flujos bajos en el periodo.
Flujos bajos (marzo-mayo y octubre-febrero)	40.00	Periodo de regulación.
Caudales de lluvias o pulsos altos de caudal (junio)	177.5	Época de lluvias.
Caudales altos (julio-septiembre)	697.00	50% de los flujos para el periodo. Se incremente 25% por día y termine cuando disminuya 10%.
Pequeñas inundaciones (al menos de dos años de retorno durante cinco días)	1 275.00	Periodo de retorno, al menos, de dos años.
Grandes inundaciones (al menos de 10 años de retorno)	3 500.00	Periodo de retorno, al menos, diez años

Preferencia de hábitats (Multivariados). El análisis de la comunidad de peces señaló un cambio de 1992 a 1997 debido a las variaciones en las condiciones del ecosistema. Se observó una substitución de especies (únicamente 33% de las especies originales permanecieron) y el 20% decreció en número. La relación especies nativas/especies introducidas fue de 1.

Los resultados del ACP revelaron tres ambientes principales: 1) áreas arenosas, con poca

vegetación, pendiente moderada, profundidades medias y someras (Grupo I); 2) áreas medio profundas con rápidos y alta velocidad de la corriente, alto contenido de oxígeno y sólidos disueltos, con rocas y grava en el sustrato (Grupo II), y 3) áreas profundas con cubierta vegetal, corrientes lentas, grandes rocas, y lodos intersticiales (Grupo III).

El AC señaló para el Grupo I velocidad de la corriente moderada ($0 - 0.29 \text{ m s}^{-1}$, con un

promedio de 0.13 m s^{-1}), profundidades de 0.53 a 1.67 m, sustrato arenosos (60 - 100%) y poca vegetación, para el Grupo II altas velocidades de la corriente ($0.24 - 0.57 \text{ m s}^{-1}$), profundidades de 0.38 a 1.70 m, con arena y alto contenido de grava (60 - 100% y rocas ocasionales), áreas totalmente expuestas a los rayos solares con poca influencia de la cubierta vegetal y para el Grupo III una velocidad de la corriente moderada ($0 - 0.29 \text{ m s}^{-1}$), pero con grandes profundidades (0.47 - 4.0 m), pequeñas y grandes rocas (70 - 80%), con o sin presencia de cubierta vegetal, aspectos que junto con las curvas nivel de la superficie del agua vs. caudales generan la estrategia de flujos

ecológicos de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los caudales mínimos necesarios o caudales extremos bajos, para el periodo de posregulación un caudal de $46.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para la época de lluvias flujos de $134 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y para los pulsos de caudal alto con $386 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, como se señalan en la Tabla 8.2.3.

Utilizando la información que proporciona el estudio de la preferencia del hábitat a través del Análisis Multivariado y las curvas de nivel de la superficie del agua vs. caudal obtenido por los modelos hidrodinámicos de la metodología *IFIM-PHABSIM*, se puede elaborar la siguiente estrategia de caudales.

Tabla 4.8.3. Propuesta para el manejo de los caudales en la presa Aguamilpa, a través del método Multivariado.

Época	Caudal ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Patrón	Importancia
Secas (marzo-abril)	30	Mínimo indispensable o caudal extremo bajo	Recurso escaso
Posregulación	46.3	Mínimo óptimo o caudal bajo	Mantener el hábitat
Lluvias (junio-agosto)	134	Flujos máximos o caudal alto	Preservar la ribera y llanura de inundación
Pico de lluvias (septiembre)	386	Vaciado rápido o pequeñas inundaciones	Conservación morfológica

Simulación del hábitat. La adecuación del hábitat en el río estimada a través del análisis de la hidrometría, topografía, batimetría y las curvas de preferencia de hábitat para la especie *Dorosoma smithii* con respecto a la profundidad y velocidad de la corriente, señaló que la superficie ponderada utilizable del río aumenta cuando el flujo se incrementa, con una tendencia asintótica a los $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Asimismo,

existió un incremento continuo en el hábitat ponderado utilizable con un primer máximo óptimo de $5\,800 \text{ m}^2$ por cada $1\,000 \text{ m}$ de río estudiado o de área adecuada para el desarrollo de la especie, cuando el flujo es de $64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ o caudal bajo para el estiaje, comportamiento asociado con el llenado del canal principal del río (Tabla 4.8.4). Un segundo pico de menor magnitud de $4\,500 \text{ m}^2$ por cada $1\,000 \text{ m}$ de

río señaló la generación de un hábitat idóneo cuando el flujo es de $185 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ o caudal alto de lluvias, que puede ser asociado con el llenado de la llanura de inundación. Después de este segundo pico, la curva continúa decreciendo indicando que las áreas con un hábitat adecuado para el desarrollo de los peces decrece cuando

el flujo aumenta debido a la saturación del área de la zona de inundación por el efecto de las laderas y a las fuertes corrientes que provocan la remoción de sedimentos y materia orgánica. Por lo tanto, los pulsos altos de caudal pueden ser entre 300 y $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y de $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para las pequeñas inundaciones.

Tabla 4.8.4. Propuesta para el manejo de los caudales en la presa Aguamilpa, por la metodología IFIM (software PHABSIM).

Época	Caudal ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Patrón	Importancia
Secas (marzo-abril)	40	Mínimo indispensable o caudal extremo bajo	Recurso escaso
Posregulación	64	Mínimo óptimo o caudal bajo	Mantener el hábitat
Lluvias (junio-agosto)	200	Flujos máximos o caudal alto	Preservar la ribera y llanura de inundación
Pico de lluvias (septiembre)	350-500	Vaciado rápido o picos de caudal alto	Conservación morfológica
Pequeñas inundaciones (septiembre)	800	Pequeñas inundaciones	Conservación de ecosistemas asociados

El análisis comparativo de las estrategias de caudales ecológicos por medio de las cuatro metodologías observa una gran similitud entre ellas para la definición de los patrones de caudales, específicamente para los métodos multivariado e IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology, software PHABSIM*).

Sin embargo las cuatro metodologías manejan flujos similares para los caudales extremos bajos, caudales bajos y los caudales altos. La variación principal entre las diferentes metodologías radica en la magnitud del caudal asignado para los pulsos altos de caudal y pequeñas inundaciones (Figura 4.8.1).



Figura 4.8.1. Análisis comparativo de las estrategias de caudales ecológicos determinadas en el río Santiago por las cuatro metodologías (Tennant modificado, IHA, Multivariado e IFIM-PHABSIM).

La Tabla 4.8.5 muestra los rangos de preferencia para la velocidad de la corriente, profundidad y caudales ambientales recomendados por los tres métodos. Se destaca una alta similitud en los rangos considerados como óptimos para el desarrollo de las especies en función de la velocidad de la corriente entre el método de Tennant modificado y el Multivariado. El intervalo que señaló como

preferente *IFIM-PHABSIM* se encuentra dentro del margen que indicaron los otros dos métodos. Para la profundidad el Multivariado muestra valores que abarcan los obtenidos por Tennant modificado e *IFIM-PHABSIM*. Para los caudales recomendados, tanto por Tennant e *IFIM-PHABSIM*, se destaca la similitud en los resultados con un error de variación de 8.5 por ciento.

Tabla 4.8.5. Cuadro comparativo de los rangos de preferencia de hábitat y los resultados de aplicar los caudales ambientales en el río Santiago.

Variable	Tennant Adaptado Zonas de México	Alteración hidrológica (IHA)	Simulación del hábitat (PHABSIM)	Preferencia de hábitat (Multivariado)
Velocidad de la corriente (m s ⁻¹)	0.24 - 1.07		0.1- 0.27	0.24 -1.10
Profundidad (m)	0.30 - 0.91		1.35 - 2.6	0.8 - 3.0
Caudales recomendados (m ³ s ⁻¹)	Secas 37.12 Lluvias 55.67	Secas 40 Lluvias 177.5	Secas 40 Lluvias 64	Secas 46.3 Lluvias 134

4.8.3 DISCUSIÓN

El método de Tennant adaptado a las zonas tropicales y subtropicales de México. Refrenda su consistencia siempre y cuando se considere: 1) un caudal mínimo recomendable del 20%, y 2) su apego al análisis histórico de la variación de caudales del río en consideración, para tratar de reproducir los patrones naturales de flujo (caudales extremos bajos por cortos periodos o 10% del caudal promedio anual, caudales aceptables del 30 - 40% para la época de lluvias y del 200% para los caudales altos). Es fácil y rápido de aplicar y puede ser utilizado en las fases tempranas del manejo integral y adaptativo de las cuencas.

El método de alteración hidrológica, IHA (*Indicators of Hydrological Alteration*). Es un *software* que se utiliza como herramienta para calcular las características de los regímenes hidrológicos naturales y alterados de los cuerpos de agua y, por lo mismo, trabaja con cualquier tipo de datos hidrológicos de ríos, arroyos, lagos y aguas subterráneas. Este método es útil para resumir largos periodos de registros hidrológicos en forma de series estadísticas de los parámetros hidrológicos y ecológicos relevantes del sistema en estudio. La aplicación del *software IHA* al río Santiago señaló que:

- Los caudales extremos bajos de 25.49 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) durante la época de estiaje más severa o para 15 días del mes de abril permitirán mantener el balance competitivo entre las especies riparias y los organismos tolerantes al estrés. Asimismo, se generarán sitios para la colonización de plantas. Se establecerá la compatibilidad del régimen de caudales con los ciclos de vida de los organismos, generándose las señales para la migración y desove de los peces.
- Los caudales bajos de 40 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) durante la mayor parte del año (octubre-marzo) proporcionarán la disponibilidad de hábitats para los organismos acuáticos. Mantendrá la suficiente humedad para las plantas. Habrá disposición de agua para los organismos terrestres, así como de alimento para los animales. Se generarán espacios para el anidamiento de especies mayores de depredadores. Se mantendrán los niveles de agua, oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua.
- Caudales altos en la época de lluvias de $177.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, durante la época de lluvias (septiembre) con una variación que simule el hidroperiodo (frecuencia, duración y magnitud) para la zona de estudio o sea un 50% de los caudales altos para el periodo considerado, con incrementos del 25% por día en los caudales hasta que termine el periodo de lluvias cuando se alcance una disminución del 10% del caudal determinado como caudal alto para la conservación de la vegetación de la ribera.
- Pulsos de caudal altos de $697 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Estos caudales propiciarán la distribución de las comunidades de plantas en las charcas, humedales y planicie de inundación. Asimismo, se liberará de desechos y se propiciará el aireamiento de los sedimentos de los canales y zonas de desove. Se incrementará el acceso a los hábitats específicos para la reproducción, crianza y refugio de depredadores. Se generarán espacios para el desove y la migración. Se generarán las condiciones para cubrir las estrategias de las historias de vida y los mecanismos de comportamiento específico para cada especie. Se generarán las condiciones para el intercambio de materia orgánica entre el río y la planicie de inundación. Se tendrá mayor

disponibilidad de sólidos minerales. Se mantendrá la calidad del agua. Estos flujos mantendrán los niveles de humedad en el suelo en los hábitats para la fauna y flora terrestre, en los canales anexos, y se generarán las condiciones para la adecuada distribución de semillas. El transporte de arena y partículas finas se incrementará. Los balances requeridos de sales/agua en conexión con el océano y los estuarios se conservarán y la recarga de acuíferos se mantendrá en buenas condiciones.

- Pequeñas inundaciones durante el periodo de máximas lluvias (septiembre) y por un periodo de retorno cada dos años de $1\ 275\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$ para la inundación y preservación de la ribera.
- Grandes inundaciones al menos cada diez años de $3\ 500\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$ durante septiembre, siempre y cuando los asentamientos humanos en las zonas de inundación lo permitan.

El método de preferencia de hábitat (Multivariados). La aproximación multivariada para la evaluación física de los ríos proporciona una perspectiva integrativa de la operación ecológica del sistema ripario, así como para el estudio e investigación de los procesos ecológicos, aspectos esenciales en la generación de iniciativas para el manejo y la conservación. La calidad ecológica en un río depende no solamente de las propiedades estructurales, sino también de las interrelaciones entre la geomorfología y la hidrología. La fluctuación en el nivel del agua conduce a un continuo cambio en la posición de los microhábitats y determinan la disponibilidad, conectividad y calidad de los refugios en cada microhábitat.^{7, 10, 13, 14, 32, 37, 56, 71, 95}

El análisis multivariado señaló la importancia de asegurar la presencia de tres tipos de ambientes.

- Las zonas de vegetación sumergida y aguas someras donde son abundantes las especies pequeñas (poecílicos) y detritívoras u omnívoras que se desplazan hacia los sitios someros y áreas de inundación con velocidades de corriente moderadas a bajas, donde existe alta sedimentación y permanencia de alimentos autóctonos.
- Áreas profundas de rocas y peñascos para las especies depredadoras, nidificadoras y territoriales, que prefieren zonas con pared abrupta y substrato rocoso con altos contenidos de oxígeno y sólidos disueltos que favorecen el establecimiento de comunidades planctónicas y la permanencia de insectos en la superficie.
- Lugares arenosos de poca profundidad y alta velocidad de la corriente con materia orgánica en constante suspensión o zonas de corrientes rápidas.

Método de simulación del hábitat (IFIM-PHABSIM). La metodología *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM), combinada con las técnicas de simulación hidráulica unidimensional y el concepto de curvas univariadas produjo el *software PHABSIM*, que utiliza los modelos de simulación hidráulica para predecir las velocidades y la profundidades de los caudales, utilizando los principios de física e ingeniería con la finalidad de obtener el área superficial y los valores de adecuación de la profundidad, velocidad y condiciones de canal, y generar un índice de hábitat potencialmente utilizable por las especies en el río con los cambios del caudal. La aplicación de la metodología al río Santiago señaló que los requerimientos de flujo para los peces, calidad del agua, simulación de las curvas de área y hábitat ponderado utilizable cuando cambia el caudal en el río, así como las condiciones hidrológicas actuales e históricas,

sugieren un régimen de flujo para el manejo de la presa Aguamilpa de la siguiente manera:

- Pulsos extremos bajos en abril de $25.49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante 15 días para la limitación en el crecimiento de algunas especies de plantas invasivas del corredor fluvial.
- En la época de secas marzo-mayo flujos mínimos óptimos (caudales bajos) de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sobre todo cuando el recurso agua es limitado (en secas).
- Para un patrón general de caudales posregulación se requiere una descarga promedio mensual estable de $64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante los periodos de manejo y regulación como caudal mínimo óptimo (en lluvias).
- En junio y julio caudales de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la conservación de la ribera.
- En agosto (en el pico de las lluvias) flujos entre $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como caudal máximo para mantener y conservar la estructura del río y la llanura de inundación (sobre todo cuando las condiciones climáticas y la producción hidroeléctrica requiere del vaciado rápido de la presa). En épocas de lluvias, estos caudales estimados como ecológicos, pueden remover sedimentos del fondo y vegetación excesiva acumulada en el fondo. Estos caudales son algunas veces necesarios para la conservación morfológica del río y



Río Santiago.

la zona de inundación, con la finalidad de mantener también la cubierta vegetal de los corredores fluviales.

El método de Tennant modificado, el hidroperiodo (*IHA*), los análisis Multivariados y el modelo de simulación del hábitat (*PHABSIM*) señalaron que la distribución y abundancia de las especies en el tramo de río estudiado puede explicarse en orden de importancia por la variación ambiental de la composición fisicoquímica del agua, la frecuencia, duración y magnitud de los caudales, así como por la velocidad de la corriente, substrato, profundidad y vegetación terrestre, variables susceptibles a las variaciones naturales de los cauces y/o a la variación artificial provocada por el manejo de los caudales de descargas de las presas.^{8, 13, 46, 62}

La complejidad de los ecosistemas requiere de la participación de la ecología en la administración de los ríos. Los análisis del hábitat difieren unos de otros según sean los objetivos del estudio, la forma en que se obtiene la información, los métodos de análisis aplicados y las variables involucradas. La complejidad de los métodos varía según el enfoque y escalas de aproximación; la información que proporcionan es muy útil a diferentes niveles. Las políticas de manejo deben evaluar adecuadamente los problemas sociales, políticos, económicos y ambientales para no generar conflictos entre usuarios.



4.9. MÉTODOLOGÍAS HOLÍSTICAS

Recientemente, se ha aplicado una combinación de las metodologías BBM y DRIFT en países en desarrollo donde datos, tiempo y dinero están restringidos, y la población rural depende del río para su subsistencia.^{14, 15, 16}

En la aproximación holística, los científicos del agua de muchas disciplinas integran el conocimiento de los datos, aplicando los métodos de su elección para desarrollar una relación comprensible caudal-ecosistema. Posteriormente, trabajan unidos en el contexto de aproximación holística para alcanzar consensos sobre los caudales ambientales, cuya finalidad será la descripción de un régimen de frecuencia y duración necesarias para mantener una condición específica del río.^{6, 7, 8, 14, 16, 56, 71, 77}

Las metodologías holísticas esencialmente organizan y utilizan el conocimiento actual de los caudales para relacionarlos con diferentes aspectos del ecosistema fluvial. Por lo regular, incorporan algunas metodologías prescriptivas que fijan valores de caudal para las diferentes épocas del año a través de un panel de expertos. Esto implica la interacción con varios procedimientos para generar una “salida” o estrategia que no hubiera sido posible en forma aislada. Debido a que en el hemisferio norte los métodos se han dirigido principalmente al análisis de una especie blanco de valor comercial, limitando el enfoque y la aproximación para el manejo holístico del ecosistema fluvial, estas metodologías se han desarrollado en la parte sur del hemisferio.^{6, 7, 8, 13, 14, 15, 43}

Downstream Response to Imposed Flow Transformations (DRIFT) o Respuesta Aguas

Abajo por las Transformaciones Impuestas al Caudal, se desarrolló en un proyecto para la cuantificación de los caudales ambientales en Lesotho Highlands, Sudáfrica. DRIFT culminó con uno de los mayores grupos de trabajo multidisciplinario que se hayan asignado para generar acuerdos para una gran cantidad de escenarios biofísicos y socioeconómicos en un río. Los especialistas usaron metodologías específicas para cada uno de los componentes del régimen de caudales y para la colecta de los datos con la finalidad de estructurar y predecir las consecuencias de los cambios en los caudales en el sistema fluvial. Por ejemplo, *PHABSIM II* se podría utilizar para modelar los cambios del hábitat de los peces a un determinado nivel de la superficie libre del agua. DRIFT también utiliza los datos sobre uso cultural y de subsistencia del río para predecir las implicaciones socioeconómicas del cambio de caudales.^{13, 14, 15, 32}

Además de las cuatro metodologías antes escritas para cuantificar los caudales ambientales, están las metodologías que en su aproximación o análisis consideran diferentes aspectos de las relaciones hábitat-biota-caudal (u otras), en el ecosistema, para explorar componentes específicos del río que proporcionen mayor información. Las metodologías DRIFT, BBM y otras consideradas como holísticas para medir los caudales ambientales, comprenden cuatro módulos (biofísico, social, económico y desarrollo de escenarios). DRIFT ofrece un avance innovador en la cuantificación de los caudales ambientales. El equipo multidisciplinario identifica las consecuencias de reducir las descargas asociándolas a un tipo particular de característica o función biofísica (hidráulica-hidrológica) natural, considerando una serie de caudales y posible deterioro

en cierta condición del sistema fluvial.^{14, 15, 16, 56} En seguida, se establecen ligas con las consecuencias sociales que se evalúan a través de sus implicaciones ecológicas, geomorfológicas y económicas relacionadas con la subsistencia de los usuarios en términos de compensación y mitigación. Los métodos y enfoques deben incorporarse dentro de un marco más amplio de evaluación que identifique el problema, utilice el mejor método técnico y presente resultados a los tomadores de decisiones.^{14, 15, 16, 42, 56, 71}

DRIFT y BBM son parecidos. Desarrolla un trabajo más integral al abordar todos los aspectos del sistema fluvial. Es un marco

basado en escenarios que ofrece al tomador de decisiones una serie de opciones de regímenes futuros de caudal con sus consecuencias para la condición del río. DRIFT tiene cuatro módulos para definir los escenarios con sus implicaciones sociales y económicas. Tal vez, su rasgo más importante e innovador es un módulo socioeconómico sólido, que describe los impactos previstos de cada escenario en la subsistencia de los usuarios de los recursos de un río. De no haber este tipo de usuarios en régimen de propiedad común de subsistencia, se pueden omitir los módulos 2 y 4. Brown y King (2003), Dyson *et al.*, (2003) y King *et al.* (2003) los describen de la siguiente manera:



Río Verde, Oaxaca (Fotos: Luis Bravo I.).

4.9.1 METODOLOGÍA MARCO DE RESPUESTA RÍO ABAJO ANTE LA TRANSFORMACIÓN IMPUESTA EN EL CAUDAL (DRIFT)

La metodología DRIFT está constituida por cuatro módulos:^{13, 14, 15}

Módulo 1: Biofísico. Dentro de las limitaciones del proyecto, se realizan estudios científicos de todos los aspectos del ecosistema fluvial: hidrología,

hidráulica, geomorfología, calidad del agua, vegetación riparia, plantas acuáticas y semiacuáticas, invertebrados acuáticos, peces, mamíferos semiacuáticos, herpetofauna y microbiota. Los estudios se relacionan al caudal, para predecir como cambiará cada parte del ecosistema en respuesta a cambios específicos de caudal.

Módulo 2. Socioeconómico. Se llevan a cabo estudios de todos los recursos del río

relacionados al régimen de propiedad común para la subsistencia de los usuarios. Se analizan los perfiles de salud de la población involucrada y de los recursos agropecuarios relacionados con el río. Se estima el costo de los recursos utilizados. Todos los estudios se relacionan con el caudal, a fin de predecir cómo se verán afectadas las personas debido a cambios específicos en el río.

Módulo 3. Desarrollo de escenarios. Que los involucrados desearían analizar para cada uno de los regímenes futuros de caudal. Se utiliza la base de datos generada en los módulos 1 y 2. Se describen, tanto el cambio previsto en la condición del ecosistema fluvial como el impacto previsto de cada escenario, sobre la subsistencia los usuarios en régimen de propiedad común.

Módulo 4. Economía. Calcula los costos de compensación de cada escenario para la subsistencia de los usuarios en régimen de propiedad común.

Si bien DRIFT se utiliza para desarrollar escenarios, su base de datos puede servir para definir caudales con objetivos específicos. Dos actividades extras fuera de DRIFT proporcionan información adicional para quienes toman decisiones:

- a) una evaluación macroeconómica de cada escenario. Describe sus implicaciones regionales más generales en cuanto a desarrollo industrial y agrícola, costo del agua para áreas urbanas, y

- b) un proceso de participación pública, donde el conjunto de las partes interesadas puede expresar su nivel de aceptación de cada escenario.

DRIFT ha sido aplicado a los ríos Breede y Pamiet, Sudáfrica y, en forma rápida abreviada, en Zimbabwe. Su aplicación total pudiera parecer costosa debido a su índole multidisciplinaria, pero a menudo es cuestión de trueque: cuanto mayor es la inversión en evaluaciones y estudios, crece la confianza en los escenarios generados. La perspectiva de los costos es importante. La mayor parte de las evaluaciones de caudal ambiental se realizan como parte de la planificación del proyecto para una presa: un estudio global de DRIFT probablemente costará menos del 1% del costo total de la presa.³²

La elección de un método particular depende, sobre todo, de los datos disponibles y del problema que haya que abordar. Se pueden definir una serie de categorías. En los casos en que hay que evaluar muchas cuencas fluviales, un método rápido como *IHA* sería el más apropiado.^{71, 95}

La metodología DRIFT incorpora los aspectos de los métodos anteriores y los dirige hacia la producción de escenarios biofísicos y socioeconómicos. Se describen los detalles de las actividades que ha generado cada especialista, en forma similar a como se describe en los manuales de BBM. Por lo tanto, requieren el mismo tipo de datos.^{14, 15, 16}

La metodología DRIFT fue diseñada para describir un régimen de caudal potencial considerando ciertas predicciones, llamadas escenarios, en los proyectos de desarrollo de presas, embalses, derivaciones, etc., específicamente para aquellos que funcionan como fuentes de abastecimiento de agua. Escenarios:

- consecuencias biofísicas en las condiciones del ecosistema fluvial;
- consecuencias socioeconómicas para la subsistencia de los usuarios, como resultado de la modificación de los caudales en las condiciones del río,
- un esquema de producción de agua.

En paralelo con la aplicación de DRIFT, deben concurrir otras dos actividades:

- 1) Cuantificar la amplitud de consecuencias que un caudal determinado tiene en cada escenario generado, con la finalidad de ilustrar las consecuencias macroeconómicas relacionadas, como son: pérdida o ganancia de tierra agrícola irrigada, desarrollo industrial potencial y urbano, y costos del agua para los usuarios río abajo.^{14, 15, 16, 17}
- 2) Aplicación del Proceso de Participación Pública (PPP), que corre en paralelo con el DRIFT. Inicialmente, PPP genera la información de entrada para DRIFT

sobre las necesidades (por ejemplo: pesquería de recreación, áreas de conservación, puntos de negociación o caudales azarosos), asociadas al río en cada escenario. Seguido de un proceso continuo de intercambio de información y de educación que debe permitir a las partes interesadas el entendimiento de los escenarios desarrollados por DRIFT, e indicar el grado de aceptabilidad de cada uno. Estas tres actividades relacionadas, pero realizadas de manera independiente, proporcionarán la información para la toma de decisiones. La metodología DRIFT se enfoca en el ecosistema fluvial, en la subsistencia de los usuarios y en sus recursos. Si no hay usuarios del sistema, entonces DRIFT puede ser aplicado sin el módulo socioeconómico. Otros usuarios del río (población, agricultores, sector pecuario, etc.) deberán ser representados a través del componente macroeconómico o el componente PPP (Tabla 4.9.1).^{14, 15, 16, 32}

Tabla 4.9.1. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos y las características de los caudales ambientales (modificado de Dyson *et al.*, 2003).

Método	Subclase	Ventajas	Desventajas
Cuadro de consulta	Hidrológica. Ecológica.	Menos caro, de uso rápido una vez calculado.	No es específico de cada sitio. Los índices hidrológicos no son ecológicamente válidos. Los índices requieren datos de cada región.
Por computadora	Hidrológica. Hidráulica. Ecológica.	Específicos para cada sitio. Recopilación limitada de nuevos datos.	Se requieren una serie temporal larga. No hay uso explícito de datos ecológicos para poder calcularlos, requieren datos de cada región.
Por computadora	Ecológica.	Flexible, sólido, dirigido hacia el sistema como un todo.	Resulta caro recopilar todos los datos relevantes y utilizar un grupo de expertos. Puede no conseguirse el consenso de los expertos.
Modelos de hábitat	Hidrológica. Hidráulica. Ecológica. Simulación.	Repetible, predictivo.	Costoso recopilar datos hidráulicos y ecológicos.

Como toda aproximación holística, DRIFT es, en esencia, una herramienta para el análisis de las informaciones biofísica, social, económica y política. Por lo tanto, permite la utilización de aquella y ofrece el conocimiento para obtener la mayor ventaja en un proceso complejo y estructurado. El punto central consiste en que diferentes regímenes de caudales darán como resultado diferentes respuestas sobre el ecosistema fluvial. Así, al remover una parte del régimen de caudales, esto afectará en forma diferente a otra parte del ecosistema con el mismo caudal.^{14, 15, 16, 32} Por lo mismo, se supone que:

- Es posible describir en forma aislada las consecuencias biofísicas probables de la modificación parcial o total en una de las partes del sistema fluvial.
- Las partes de un determinado régimen de caudal y sus consecuencias enlazadas pueden ser recombinadas de varias maneras para describir la condición del río y cualquier régimen de caudal de interés (la parte biofísica del escenario).
- Los impactos sociales en la condición de una parte del río pueden ser descritos (la parte socioeconómica del escenario).

Aunque el mismo proceso puede ser utilizado en dirección opuesta (hacia la adición de caudales) como parte de la rehabilitación de un río degradado, generalmente la metodología se aplica en la reducción de los caudales en los ríos.^{14, 15, 16, 32}

Basados en los supuestos arriba mencionados, DRIFT utiliza los diferentes módulos para:

- 1) Diseñar y maximizar el entendimiento del ecosistema fluvial dentro del proyecto, incluyendo el análisis financiero y predicción de los efectos

del cambio de caudal en el río, describir la naturaleza actual y el funcionamiento del ecosistema, desarrollar la capacidad predictiva de la repercusión de los cambios con la manipulación de los caudales y crear una serie de posibilidades de cambio relacionada con los caudales (M. Biofísico).

- 2) Maximizar el conocimiento sobre el uso de los recursos del río por la población y predecir cómo sería afectada por los cambios en el caudal del río, identificar riesgos para los usuarios cuando los caudales son manipulados y cuantificar sus relaciones con el río (M. Social).
- 3) Relacionar la información generada en los dos módulos anteriores para producir los escenarios biofísicos y de subsistencia. La mitigación de costos y compensaciones debe de ser adecuadamente dirigida. El módulo construido a través de escenarios permite evaluar los impactos en la población.
- 4) Resumir los costos y beneficios del desarrollo en el módulo económico.^{14, 15, 16, 32}

Un reto de la década consiste en transformar la información hidrológica mediante curvas de duración de caudal diario, mensual, estacional, anual o por periodos más largos, para que pueda utilizarse ecológicamente, estableciendo los picos y valles en las descargas durante un largo periodo con el fin de deducir si el régimen de caudales ha cambiado y/o ha afectado al ecosistema fluvial.^{14, 15, 16, 32}

Con la información hidrológica es difícil analizar ecológicamente cómo el cambio en el

caudal afectará la composición, estructura y función del ecosistema fluvial, y según King *et al.* (2003), se requiere de un arreglo de los datos de la siguiente manera:

PRIMERO. Identificar los diferentes componentes o categorías del régimen de caudales preponderantes en el mantenimiento del ecosistema fluvial. Un resumen con las diferentes categorías de caudales (caudales extremos bajos, caudales bajos, caudales altos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones, grandes inundaciones) abrirá una nueva perspectiva ecológica del río. El resumen de los datos debe permitir comparar el pasado, presente y reconocer un potencial futuro de regímenes de caudal de un río en particular, y proveer mayor información para establecer escenarios posibles. Tal información sobre los cambios potenciales en el caudal pueden dirigir la investigación hacia el cómo cada categoría de caudales contribuirá al mantenimiento del río.

SEGUNDO. Predecir cuantitativa y holísticamente cómo se modificará el río con el caudal manipulado, en una situación en la cual los datos son pocos y el nivel de incertidumbre alto. Es importante que las predicciones tengan: 1) un carácter holístico, 2) sean cuantitativamente seguras y 3) que la información disponible sea fehaciente.

Las predicciones holísticas se generan bajo la filosofía de que:

1. El ecosistema debe ser activamente manejado en cualquier condición fuera de la prístina.
2. Todos los componentes abióticos y bióticos del ecosistema contribuyen a la unidad (río) que está manejándose.

3. Dentro de los componentes abióticos, el espectro total de caudales con su variabilidad temporal contribuyen al manejo de los caudales.

El equipo multidisciplinario para el manejo holístico debe ser capaz de aplicar el análisis científico (metodologías BBM o DRIFT). Así, el equipo de Sudáfrica incluyó expertos en geografía, hidrología, hidráulica, modelación hidrodinámica, limnología y botánica fluvial, geomorfología, ictiología, ecología de invertebrados acuáticos; e información básica de sedimentología, vida silvestre terrestre, mamíferos dependientes del agua, herpetofauna, microbiología acuática y plancton. En la selección holística, el equipo de trabajo debe generar:

- 1) el estudio de la naturaleza (composición), estructura y función del río, dentro del tiempo y limitaciones financieras del proyecto,
- 2) la capacidad predictiva y desarrollo de escenarios posibles en el río, si el régimen de caudales cambiara.^{14, 15, 16, 32}

Las curvas de duración de los caudales son poco útiles en la interpretación ecológica de los datos hidrológicos pero, combinadas con los modelos hidráulicos, permiten definir el área y periodo de la zona de vegetación ribereña que debe inundarse, facilitando una primera predicción tentativa de las consecuencias que tendría un cambio de caudal en la extensión de la zona de inundación, su expansión o desaparición, útil para los planes de restauración.

Los escenarios en las diferentes disciplinas los generan los distintos especialistas, mediante tentativas similares basadas en los modelos

conceptuales desarrollados y las relaciones iniciales para las categorías de caudales y la morfología del canal:

1. Los hidrólogos describen los cambios que ocurrirían en cada categoría de caudales.
2. Los geohidrólogos (si es relevante), generan las predicciones del cambio del caudal subterráneo y las variaciones en la altura del agua en el acuífero.
3. Los modeladores hidráulicos analizan el comportamiento del caudal superficial bajo diferentes condiciones y su relación con los posibles niveles del espejo de agua, respecto a la ribera y zona de inundación durante la estación seca y lluviosa.
4. Los sedimentólogos y geomorfólogos se aplican a predecir los cambios en el canal bajo diferentes condiciones hidráulicas, incluyendo la recarga de manantiales, sedimentación o formación de barreras, cambios en la movilidad y tamaños de las partículas de sedimento, pérdida o ganancia de depósitos en terrazas y acumulación o pérdida de depósitos de lodo dentro del canal activo.
5. Biólogos e hidrobiólogos determinan la calidad del agua; sus cambios térmicos y químicos; los cambios en la concentración de nutrientes disueltos y su relación con las composición, estructura y función de las comunidades de flora y fauna acuática y terrestre asociadas al río.
6. Con las predicciones abióticas previas, los botánicos deberán primero describir las respuestas de la biota esperada para

después predecir cómo cambiaría cada tipo de vegetación típica en su localización, abundancia u otra característica, así como la abundancia de las especies con los diferentes regímenes de caudales.

7. Conociendo los posibles cambios en los factores abiótico y vegetativo del hábitat, los especialistas pueden predecir los cambios en las comunidades de invertebrados, incluyendo la abundancia relativa de las especies sensibles a ciertas variaciones.
8. Los microbiólogos pueden predecir los cambios en el plancton, incluyendo parásitos, patógenos y la aparición de algas tóxicas.
9. Los ictiólogos pueden predecir cambios en la comunidad de peces, incluyendo composición, abundancia y condición de la comunidad.
10. Los especialistas pueden predecir, si se considera relevante, las afectaciones a los anfibios, reptiles, aves acuáticas, mamíferos semiacuáticos y otra fauna de vida silvestre dependiente del río.^{14, 15, 16, 32}

Los procesos fisicoquímicos y biológicos analizados en el módulo biofísico pueden ser utilizados para predecir la respuesta a los cambios en un solo tipo o categoría de caudal, o secuencialmente definir la respuesta en todas las partes del régimen de caudales a lo largo de todo el río. Igualmente, los especialistas pueden predecir el tiempo y la extensión del cambio a través de cinco niveles de severidad.^{14, 15, 16, 32}

La severidad de la respuesta al cambio puede deducirse analizando las variables sensibles a

variaciones del caudal. Es necesario generar tanto los escenarios observados con todos los cambios posibles, como las proyecciones o predicciones posibles que serán detalladas dentro de una lista de indicadores para cada disciplina.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

Cuando el equipo de trabajo considere un posible cambio en el ecosistema por el cambio en el caudal, puede asignar un índice de “severidad de cambio” para cada punto en la lista de indicadores y un valor para cada modificación. Por ejemplo, si el caudal involucra un incremento o decremento en la abundancia (peces, macroinvertebrados, vegetación riparia, hidrófitas, etcétera) en el área, o en la concentración, generando un cuadro comparativo de datos de caudal-respuesta.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

TERCERO. Describir las posibles afectaciones a las características del uso del río por las comunidades rurales con los cambios predichos. Generalmente, existen comunidades rurales que dependen de los ríos para su supervivencia en los países en desarrollo. Los peces, ranas y aves acuáticas pueden ser parte de su fuente principal de proteínas; algunas especies de vegetales y hierbas, que forman parte de la zona riparia, e hidrófitas del cauce, pueden proveer nutrientes y medicinas a los pobladores. En áreas semiáridas, lejanas al río, los árboles de la rivera proporcionan leña y materiales para la construcción de viviendas. Además, el río puede cubrir aspectos sanitarios, culturales, de recreación y de hábitos religiosos de las comunidades aledañas. Debe considerarse que estos aspectos pueden ser impactados río abajo con los cambios del caudal. Medir estos impactos está incluido en la segunda parte de la metodología para la cuantificación de los caudales ambientales.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

Debe enfatizarse que los métodos holísticos, como el DRIFT, incluyen un módulo socioeconómico enfocado a las comunidades que utilizan el río, como parte del módulo biofísico.^{14, 15, 16} Los especialistas, en este punto, pueden pertenecer a los campos de la salud pública, zootecnia, antropología, sociología y economía; son los encargados de cuantificar los recursos y la disponibilidad de agua. Su tarea es:

- 1) estudiar la utilización del agua por las comunidades aledañas al río, y
- 2) predecir cómo podrían afectar a las comunidades los cambios del caudal.

La relación cercana entre los expertos de los módulos biofísico y socioeconómico asegura la identificación de los atributos del ecosistema más importantes en la vida de las personas (un determinado pez, una especie de árbol, una plaga de insectos), y así incluirlos en el estudio y señalarlos como indicadores en la lista potencial de los efectos de los cambios de caudal. Dichos atributos y sus afectaciones se describen en la lista de puntos indicadores con ciertos grados de severidad, a fin de que puedan ser utilizados en la estructuración de los posibles escenarios para ciertos grados de impacto.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

CUARTO. Generar la información de manera que los tomadores de decisiones la puedan utilizar. Debe enfatizarse la mejor comprensión de las interrelaciones entre los caudales y el ecosistema fluvial, y entre los cambios de caudal y los impactos en las comunidades, ya que tienen el mismo peso. El conocimiento generado debe expresarse en los términos adecuados para que los tomadores de decisiones lo puedan utilizar.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95} Son tres los requerimientos principales para tal fin:

1. generar un rango de opciones de lo que puede acontecer en el futuro, utilizando escenarios del cambio potencial de los caudales y sus impactos sociales,
2. generar un resumen simple con cada escenario dentro del contexto de los cambios del caudal, de tal manera que los tomadores de decisiones puedan relacionarlos,
3. expresar las implicaciones financieras de cada escenario propuesto en términos de impactos y costos para la compensación o mitigación, y beneficios. Ejemplo: el incremento en la generación de energía de las hidroeléctricas y la producción de cereales, el desplazamiento de comunidades, la inundación de tierras agrícolas, la pérdida de especies, etcétera.

No todos estos puntos pueden ser necesarios en el análisis. Sin embargo, la relación predictiva: cambio de caudal/respuesta del ecosistema, generada por el equipo biofísico de especialistas, puede utilizarse para construir una base de datos en la cual se puedan mezclar de diferente manera para producir varios escenarios y predecir la severidad de los impactos en las comunidades aledañas a los ríos.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

La comprensión de estos impactos es una materia compleja, debido a que no solo deben considerarse las pérdidas directas de recursos, sino también cuantificar los costos de reemplazo y mitigación que aseguren que no se van a deteriorar las condiciones de salud de las comunidades asociadas al sistema fluvial (la compensación de costos y las pérdidas de los recursos son tomados en cuenta en este módulo). Los tomadores de decisiones deberán

conocer el valor de los recursos del río y los costos que implicaría su pérdida o ganancia con los cambios en el caudal.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

QUINTO. Una guía para el monitoreo y manejo adaptativo. Una vez cuantificados, se genera una base de datos sobre los diferentes escenarios predecibles de la condición del río, o del estado deseado para el río, tomando en consideración el régimen de caudales involucrado dentro de los posibles escenarios de caudal ambiental. El siguiente paso es la implementación de un caudal ambiental, o caudal ecológico. Si este punto falla, entonces el trabajo científico, legislativo, económico y otros, fallan también. El caudal ambiental y el manejo adaptativo de los caudales son dos partes entrelazadas de la implementación. En Sudáfrica, el monitoreo de los caudales ambientales y el manejo adaptativo subsiguiente fueron las principales estrategias, seguidas de una serie de seguimientos relevantes y unas cuantas observaciones.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

El monitoreo de los caudales ambientales tiene dos propósitos inmediatos: 1) confirmar que el caudal acordado se distribuye conforme a los puntos de control seleccionados a lo largo del río, y 2) asegurar que este conserve la condición deseada.

Se necesitan programas modestos de monitoreo para obtener una idea de los posibles cambios. El análisis cuidadoso de las funciones indicadoras permitirá seleccionar unas cuantas medidas representativas del estado del ecosistema a lo largo y ancho del río. Cada tres a cinco años pueden introducirse a un GIS mapas del hábitat con relación al caudal para medir si los cambios sedimentológicos, geomorfológicos o físicos han modificado las condiciones del hábitat, y si la diversidad de hábitats se conserva. Los muestreos

anuales de las comunidades de invertebrados acuáticos podrían indicar si la calidad del agua ha cambiado, y la frecuencia anual de peces y plantas da información sobre las condiciones del ecosistema a gran escala.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

La implementación armónica con los caudales ambientales es la parte más difícil de la secuencia. Si los caudales ambientales monitoreados forman parte efectiva de un plan de implementación, las estrategias deberán ser capaces de manejar la heterogeneidad, así como la eficacia de las pruebas y prácticas, y de que los resultados del monitoreo estén proporcionando información sobre los cambios negativos en el ecosistema. Un manejo adaptativo es difícil para los grandes gobiernos y otras organizaciones, las cuales tienden a ser prescriptivas con reglas rígidas. Se requiere de una cultura para desarrollar facilidades de respuesta en programas de monitoreo constante, que generen reportes con las recomendaciones sobre modificaciones en la operación de los caudales. Si no existe un programa de investigación continua y comprensiva, será inadecuada la aplicación de los caudales ambientales desde el punto de vista del manejo holístico.^{15, 16, 17, 32, 56, 58, 71}

Para Brown y King (2003), los caudales ambientales deben combinarse con otras medidas de la mitigación complementarias, como la calidad del agua, con la finalidad de considerarlas al determinar los costos en el momento de la planeación de los desarrollos que requieran del manejo integrado de los recursos acuáticos. Asimismo, señalan que los métodos para cuantificar los caudales ambientales caen dentro de dos categorías de aproximación: 1) prescriptivos y 2) interactivos. Los métodos prescriptivos por lo general van dirigidos a un objetivo específico

definido, y proporcionan un caudal de valor determinado componente del régimen de caudales. Su recomendación no conduce a la negociación porque el esfuerzo está dirigido directamente a la justificación de un solo valor. Las metodologías interactivas, por el contrario, se enfocan en las interrelaciones y cambios en el caudal. Una vez establecidas estas relaciones, las recomendaciones no se restringen a una sola interpretación de la condición que puede generarse. Los métodos interactivos son más propicios para las negociaciones entre usuarios. Sin embargo, estas metodologías tienden a ser más complejas y costosas que las prescriptivas por el tipo de información que requieren (datos), y el tiempo para obtenerlos. Se han desarrollado varias metodologías interactivas en cada categoría.

Las Metodologías Prescriptivas. Estas pueden dividirse en cuatro subgrupos:

- Métodos basados en índices hidrológicos. Se elaboran principalmente en el escritorio y se relacionan con registros históricos de caudales para hacer una recomendación.
- Métodos basados en cálculos hidráulicos. Utilizan las relaciones entre el caudal del río (descargas) y sus características hidráulicas, como la profundidad, velocidad y perímetro mojado para calcular un caudal aceptable. La justificación de este caudal está basada en los aspectos físicos de los ríos, más que en las relaciones de caudal y necesidades de la biota del río.
- Un equipo de expertos que generen justificaciones sobre las necesidades de caudal de los diferentes componentes de la biota acuática.

Los métodos holísticos requieren de una considerable cantidad de datos sobre diferentes aspectos del río, más que de las relaciones entre el caudal y las necesidades de la biota.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

4.9.2 COMPONENTES BÁSICOS DE LA METODOLOGÍA DRIFT

Incorporación de información sociológica para la determinación de caudales. En regiones de África, Sudamérica y Asia, donde gran número de gente pobre realmente utiliza el río para su subsistencia, la determinación de los caudales debe considerar las implicaciones sociales y económicas que genera su modificación. En algunos casos, el impacto es obvio, como el deterioro del agua potable, la pérdida de peces y plantas alimenticias, o la de un estanque ceremonial. En otras es menos obvio. La baja en el consumo de vitaminas y minerales que se obtenían de plantas ribereñas desaparecidas puede deteriorar la salud de una comunidad, o los niveles del caudal pueden diluir o ayudar a la descomposición del agua que entra al río, de tal manera que el agua se ingiere con gran riesgo de contraer alguna infección.^{14, 15, 16, 32}

DRIFT esencialmente es un sistema para mantener los datos y conocimiento de una manera estructurada, a través de cinco pasos principales:

- La identificación y aislamiento de caudales altos y bajos, de las estaciones de lluvias y estiaje.
- La descripción de las consecuencias por la remoción parcial o total de algún caudal (caudales extremos bajos en época de lluvias y secas, periodicidad y frecuencia de caudales bajos al año, magnitud y periodicidad de caudales altos).

- Creación de una base de datos biofísicos que describa al detalle las consecuencias de la alteración de los caudales. Aplicación de una base de datos para describir las modificaciones en las condiciones del río con una cierta combinación de caudales altos y bajos.
- La descripción de las implicaciones socioeconómicas resultantes de tales cambios.

Esto, junto con los puntos anteriores, constituye la creación de los escenarios para los caudales ambientales.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

El propósito de los caudales ambientales y la intención de utilizar los resultados debe constituir la guía para la selección del método para cuantificarlos. Los proyectos grandes y controvertidos requieren de una aproximación más comprensiva para cuantificar dichos caudales y generar negociaciones con los usuarios sobre las modificaciones al medio, en lugar de la cuantificación limitada de los caudales dentro de los planes de estudio, donde un solo valor de caudal generalmente es considerado como suficiente.^{14, 15, 16, 32, 56, 71, 95}

Entre ambas categorías, la metodología eventualmente seleccionada para cuantificar caudales dependerá de las consideraciones técnicas de calidad y disponibilidad de datos del ecosistema fluvial, de localización y extensión del área de estudio, de restricciones de tiempo y financiamiento, y del nivel de confianza finalmente requerido. La comprensión que se va adquiriendo de una base grande de datos requiere aproximaciones interactivas con base en el conocimiento de cada uno de los sitios de interés y consumo de tiempo, en forma conjunta con el análisis de los expertos y de los caudales ambientales.^{14, 15, 16, 32, 71}

4.9.3 CASO DE ESTUDIO: RÍO VERDE, OAXACA

Las metodologías holísticas para el análisis de los caudales ambientales resultan muy adecuadas para el manejo y organización de la información sobre los regímenes de flujos, así como de los aspectos biofísico, social y económico del ecosistema fluvial.^{8, 14, 56, 71, 75, 76, 76, 90} Generan los escenarios biofísico y socioeconómico y los acuerdos para el manejo integrado del río, mediante trabajo multidisciplinario. La metodología DRIFT se enfoca a identificar las consecuencias de reducir las descargas naturales del río a través de una serie de caudales asociados a un tipo particular de característica o función biofísica, o carácter hidrológico o hidráulico específico, en términos del deterioro en cierta condición del sistema.^{14, 15, 32} Adicionalmente, establece ligas con las consecuencias sociales en relación a la subsistencia de los usuarios, evaluadas por sus implicaciones ecológicas, geomorfológicas y económicas en términos de compensación y mitigación.^{6, 16, 95}

En este estudio, patrocinado por la Comisión Federal de Electricidad, se aplicaron cinco metodologías de evaluación de caudales ambientales (Tennant Modificado, *IHA*, Preferencia de Hábitat-Multivariados, *PHABSIM* y *DRIFT*), para generar los escenarios e indicadores de impacto en los módulos biofísico y social, y determinar los regímenes de caudal estratégicos, medidas de mitigación y seguimiento para el aprovechamiento hidráulico Paso de la Reina del Río Verde, Oaxaca, con el fin de generar un manejo integrado de la cuenca y mantener el equilibrio y función del sistema fluvial con la operación de la presa.⁴⁷

4.9.3.1. Área de estudio

La cuenca del Río Verde se encuentra localizada dentro de la Región Hidrológica número 20 (RH20) Costa Chica Río Verde, que recibe este nombre por el río más importante dentro de la región. Nace al noroeste de la ciudad de Oaxaca con el nombre de Atoyac, el cual se alimenta de varios ríos hasta ingresar al océano Pacífico.³⁶ El Río Verde tiene una cuenca de 1 122.71 km², delimitada al norte por las cuencas Río La Arena 1 y río Atoyac; al sur por el océano Pacífico y la Región Hidrológica número 21 Costa de Oaxaca; al este por la Región Hidrológica número 21 Costa de Oaxaca; y al oeste por la cuenca hidrológica Río La Arena 2.⁸⁰ La región presenta climas secos en la parte alta, lluvioso con temperaturas semicálidas y cálidas en las partes media y baja. El área que drena hacia los cuerpos de agua interiores presenta suelos del Cuaternario; excepto la región norte, donde destacan rocas ígneas extrusivas ácidas del Terciario y metamórficas del Paleozoico (Figura 4.9.1).^{21, 48, 51}

Las estaciones hidrométricas utilizadas para calcular los caudales ecológicos dentro del Sistema Ambiental Regional (SAR) fueron: El Carrizo (20021) y Paso de la Reina (20017), administradas por la Comisión Federal de Electricidad²¹ y por la Conagua, respectivamente. La hidrología se elaboró con las cartas 1 a 50 000, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.⁵¹ Los afluentes principales en la margen derecha del Río Verde son: Reyes, Sola de Vega, San Jacinto, Zonzontepec, Yolotepec Cuanana y Sordo; y en la izquierda, son: Tlacolula, Ejutla, Miahuatlán, Coatlán y Juquila.²⁶ La elevación máxima en la cuenca es de 2 600 m. La vegetación del SAR es bosque caducifolio (34%), bosque de coníferas (32.4%), pastizal (13.3%),

agricultura de temporal (12.5%), agricultura de riego (2.4%), cuerpos de agua (2.0%), hidrófitas (1.9%), bosque mixto (0.7%), humedales (0.6%) y asentamientos humanos (0.2%). La diversidad natural en las zonas altas, humedales, corredor fluvial y estuarios de la cuenca soportan una amplia variedad de flora y fauna. A lo largo del río se conservan los caudales naturales.

Sin embargo, en 1994 se construyó una presa derivadora en la parte baja para apoyar a las agricultura. El área irrigada cubre 5 029.65 ha de 412 usuarios, con entregas de agua de $11.56 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hacia el lado izquierdo y $4.90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ al lado derecho, representando el 65% de la descarga del caudal natural en la estación seca y 1.6% en la estación de lluvias.⁴⁸



Río Verde, Oaxaca (época de lluvias).



Río Verde (época de secas).

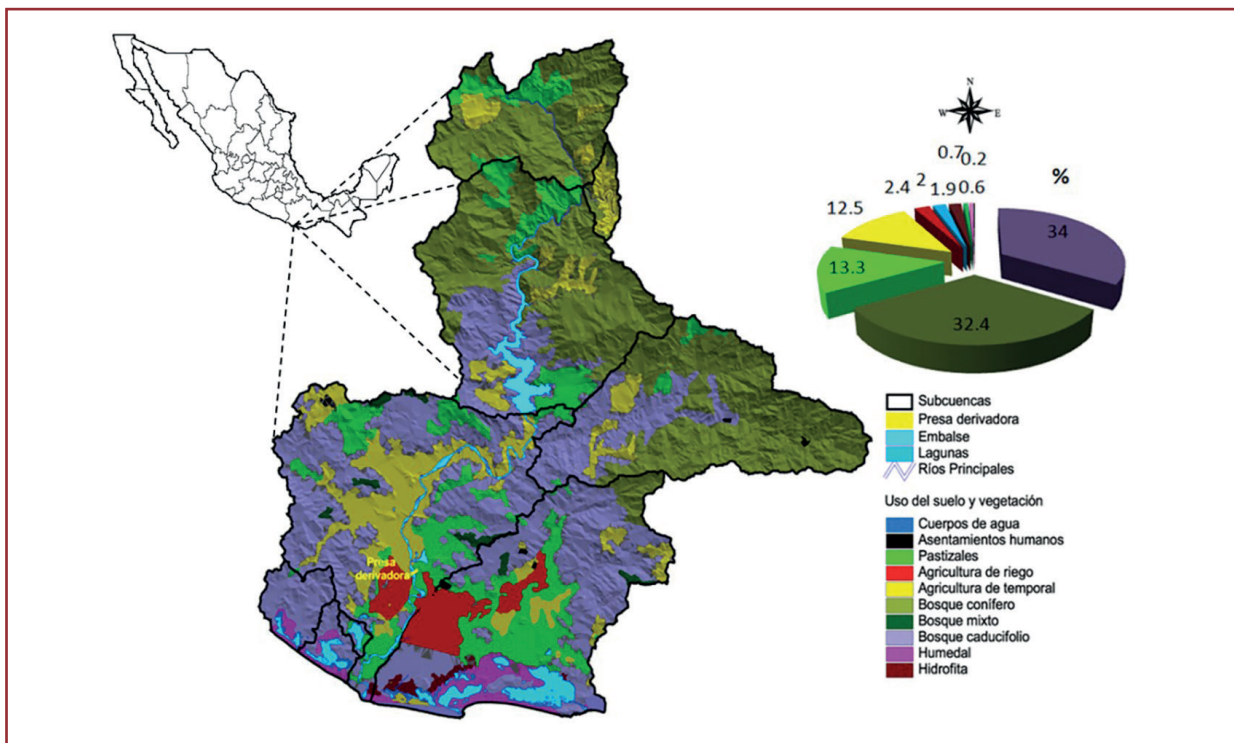


Figura 4.9.1. Hidrología, uso del suelo y vegetación en el SAR Río Verde (Oaxaca). Escala 1:250,000. Serie III, INEGI. Imágenes Landsat ETM, años 2000 y 2002, respaldada con trabajos de campo de 2002, 2003 y 2004.²⁶

También, se construyó un bordo de 24.20 km a ambos lados del río para proteger la zona agrícola, y una serie de caminos que han contribuido a la sedimentación y cambios en el régimen de caudales y ecología del río. En general, el río conserva una condición natural aceptable; la calidad del agua es adecuada para la sobrevivencia de todas las formas de vida acuática y provee los recursos necesarios para la sobrevivencia de la población rural mediante la pesca de autoconsumo y recreativa. Los estuarios soportan varias actividades agropecuarias, turísticas, urbanísticas y pesqueras (comercial y turística) que contribuyen a la economía regional. Los hábitats naturales del Parque Nacional Laguna de Chacahua entran en las actividades comerciales y contribuyen directa o indirectamente al desarrollo económico de la región.⁸¹

4.9.3.2. Métodos para calcular los caudales ambientales

- 1) Tennant modificada. Con los registros históricos de las descargas mensuales y anuales de 42 años.^{21, 41}
- 2) *IHA (Indicators of Hydrologic Alteration)* con los análisis estadísticos de 34 parámetros de los registros históricos diarios, mensuales y anuales de las descargas.^{91, 94}
- 3) Preferencia de hábitat (análisis Multivariado de las variables fisicoquímicas y biológicas para definir los requerimientos del hábitat para los peces y los macroinvertebrados.⁴⁶
- 4) Simulación del hábitat (*IFIM-PHABSIM*) o modelación hidrodinámica del río relacionada a la morfología, sustrato y cubierta vegetal del canal, y preferencia del hábitat de peces y macroinvertebrados.^{13, 48, 81, 88}

- 5) DRIFT (*Downstream Response to Imposed Flow Transformations*)^{14, 15, 16} para integrar todos los aspectos biofísicos y sociales del río, a través de acuerdos multidisciplinarios. Aborda todos los aspectos del sistema fluvial dentro de un marco basado en escenarios y proporciona a los tomadores de decisiones una serie de opciones de regímenes futuros de caudal. Junto con el análisis de las consecuencias para una cierta condición del río, semejan los estudios de decisión multicriterio. Método ampliamente utilizado también para relacionar los detalles inherentes a las evaluaciones de impacto ambiental y permitir a un grupo multidisciplinario de expertos decidir las estrategias para el manejo integrado de las cuencas, mediante la identificación de atributos ambientales en términos de rangos de alternativas.^{11, 22}

El análisis multidisciplinario se aplicó para predecir la respuesta del ecosistema a los cambios en el régimen de caudales a lo largo del río para cuando la presa esté funcionando, e incluyó un módulo de análisis biofísico (topografía, vegetación y tipo de suelo de la cuenca, hidrología, hidrodinámica, geohidrología, calidad del agua, ictiología, entomología, hidrófitas, manglar, vegetación acuática y riparia). El módulo social fue evaluado por sociólogos, antropólogos y agrónomos.

La información que se requirió consistió en:

- 1) Información geográfica digital de la hidrología, topografía, uso de la tierra, tipo de vegetación y suelo de la cuenca a través de imágenes de alta resolución supervisadas (*QuikBird* y *Landsat ETM*).

- 2) Análisis de los datos de siete estaciones hidrométricas aplicando el criterio del World Meteorological Organization (WMO) y del *software Hydrologic Modeling System o HEC-HMS V-4.0*.
 - 3) Disponibilidad de agua subterránea a través de análisis isotópicos de $^1\text{H}_2$, ^2H , ^3H , ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , usando el Standard Mean Ocean Water (SMOW), el Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), el espectrómetro de masas para deuterio y ^{18}O , enriquecimiento electrolítico y el conteo de centelleo líquido para la cuantificación del tritio ambiental del agua de los piezómetros de la cuenca.⁸²
 - 4) Modelos hidráulicos mediante imágenes *Landsat* y los métodos y *softwares* de Hydrologic Engineering Centers River Analysis System o HEC-RAS V-4.0 y the Hydrologic Modeling System o *HEC-HMS V-4.0* y *FLO-2D*) para entender cuándo y cuánto del área de la zona riparia debe de ser inundada con cierto régimen de caudal, como primera tentativa de predicción de los cambios en la zona de inundación.
 - 5) Calidad del agua, incluyendo O_2 , temperatura, turbidez, alcalinidad, pH, salinidad y conductividad medidas con una sonda multiparámetro YSI-600 para los registros en el campo; la contaminación difusa a través de técnicas de laboratorio; las metodologías de Qual2K model V 2.07; la ecuación USLE, ArcView Generalized Watershed Loading Function y el Canadian Water Quality Index-CCME WQI.^{22, 33, 35, 82}
 - 6) Estudios de peces, macroinvertebrados y la ecología de la vegetación acuática y terrestre de río a través de una aproximación del microhábitat, de preferencia de hábitat, simulación del hábitat y análisis Multivariado (Clúster, Componentes Principales y Análisis de Discriminantes), utilizados para generar las predicciones y los planes de manejo y restauración del Río Verde.^{8, 45, 56, 71, 89, 104}
 - 7) Modelos conceptuales de un panel de expertos (geólogos, geógrafos, hidrólogos, hidrodinámicos, limnólogos, zoólogos, ictiólogos y botánicos de la vegetación acuática, terrestre y manglar) utilizados en los módulos biofísico y social de la metodología DRIFT, para relacionar las categorías de caudal a la morfología del canal, zona de inundación y estado ecológico del sistema ripario.^{14, 15, 16}
 - 8) Modelos conceptuales para el módulo social fueron desarrollados por agrónomos, sociólogos y antropólogos utilizando entrevistas directas y estandarizadas a los granjeros, agricultores y propietarios con relación a los requerimientos de agua proporcionada por la Conagua, con la información estadística del uso del suelo y características edáficas (World Soil Resource Reference-WSRR Methodology).
 - 9) Lista de temas de estudio e indicadores de impacto para cada disciplina generados para la evaluación del sistema (Tabla 4.9.2).
- En la Tabla 4.9.2 se mencionan los indicadores de impacto ambiental evaluados para cada disciplina. Los detalles técnicos de las metodologías se encuentran en Ruiz *et al.* (2010).



Zona de transferencia (Río Verde, Oaxaca).



Zona de deposición (delta del Río Verde, Oaxaca).

Tabla 4.9.2. Módulos, disciplinas, participantes, indicadores de impacto e instituciones que proporcionaron información para la integración de los caudales ecológicos y ambientales del Río Verde (Oaxaca).

MÓDULO BIOFÍSICO	
<p>Análisis de la información geográfica espacial digital (Jorge Brena, Marco Mijangos y Werner Wruck, IMTA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mapas digitales (suelo, vegetación, hidrología). <p>Hidrología (Juan F. Gómez , IMTA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caudal medio mensual. • Caudal medio diario. • Evaporación en la presa. <p>Hidrodinámica (José A. González y Joselina Espinosa, IMTA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Características del caudal. • Dimensión del canal, forma, perfiles y patrones. • Conectividad con la zona de inundación. • Cuantificación del ensanchamiento y/o deposición. • Erosión lateral del canal. • Modificación de los bancos de aluviones. • Generación de meandros. 	<p>Peces y macroinvertebrados (Eduardo Soto y Rebeca González-Villela, IPN-IMTA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decrecimiento en la diversidad. • Decremento de hábitats. • Decremento de especies nativas. • Decremento de especies indicadoras. • Incremento de especies amenazadas o en peligro. • Incremento en la pérdida de especies. • Generación de barreras para la migración, • Desarrollo de especies exóticas, • Generación de puntos estrechos o poco profundos. • Fragmentación del hábitat acuático. • Cambio de hábitat de las especies acuáticas. • Deposición de descargas hipolimnéticas. • Alteración en la cantidad de agua estacional que requiere la comunidad de peces.

MÓDULO BIOFÍSICO

Calidad del agua (Alejandro Ruiz, Javier Sánchez , Luis Bravo y Rebeca González-Villela, IMTA)

- Físicoquímicos (O₂, pH, SDT, SST, temperatura).
- Conductividad, aceites, metales, salinidad, turbidez. Materia orgánica, etc.).
- Toxicidad.
- Coliformes.

Caudales ecológicos (Rebeca González-Villela, Ma. Gómez, Jorge Izurieta, IMTA)

- Grupo de Caudales (6).
- Alteración en la frecuencia, duración, magnitud, periodicidad y tasas de recambio.
- Tamaño y forma del río.
- Niveles de la superficie libre del agua.
- Duración anual de los caudales.
- Descargas totales anuales y mensuales.
- Alteración hidrológica.
- Regulación del caudal.
- Volumen aceptable para el mantenimiento del ecosistema.
- Balance óptimo entre el régimen de caudal.
- Preferencia del hábitat (peces y macroinvertebrados).
- Simulación del hábitat (peces y macroinvertebrados).

Vegetación de la ribera, hidrófitas y bosque de galería (Pedro Ramírez, Instituto de Biología, UNAM)

- Tipo de comunidad.
- Tipo de distribución sobre la ribera.
- Cubierta vegetal y dosel.
- Dinámica de la comunidad y sucesión.
- Reproducción, ciclos de vida.
- Conectividad.
- Pérdida de zonas con dosel o cubierta vegetal.
- Usos de la tierra que generan impactos sobre el corredor fluvial.
- Pérdida de vegetación de distintas comunidades.
- Fragmentación de corredores de vegetación silvestre.
- Reducción de hábitats de vegetación silvestre.
- Plantas utilizadas por la población.
- Suministros de agua.
- Deposición de desechos.
- Cantidad de agua estacional que requiere la vegetación para su conservación.
- Nivel de la superficie libre del agua estacional que requiere para su conservación.

Aguas Subterráneas (Miguel A. Mejía, IMTA)

- Almacenamiento de agua del acuífero.
- Balance de agua.

Manglares (Claudia Agras - UAC)

- Estructura y función de la comunidad.

MÓDULO SOCIOECONÓMICO

Usos del suelo (Dolores Olvera y Marcia Yáñez, IMTA)

- Desechos por agricultura; agricultura de riego, de temporal, de goteo y tecnificado; actividades pecuarias; zonas de tránsito; superficie sembrada; empleo; migración; cultura; costumbres y escolaridad.

Utilizando varios GIS o métodos analíticos espaciales, se evaluaron las causas y efectos relativos entre los factores de estrés e indicadores clave, cambios temporales en el uso de la tierra y tipos de cubierta vegetal con la presencia de factores antrópicos en el área de la cuenca del Río Verde. Con la información obtenida de otras disciplinas a través de matrices de datos, se definieron:

- 1) Indicadores de impacto sugeridos por cada disciplina.
- 2) Estado actual del indicador.
- 3) Tendencias y escenarios con los cambios de caudal.
- 4) Evaluación del impacto a través de la ecuación (1).
- 5) Medidas de mitigación para cada indicador y disciplina, acorde con la metodología sugerida por Bojórquez (1989).^{48, 81}

El análisis de indicadores de impacto fue aplicado a diferentes segmentos del río, lo que generó

una visión de los factores de estrés de la cuenca y resumió algunos de los impactos potenciales de los estresantes de otras disciplinas. Esto proporcionó un marco de referencia en donde pudieran evaluarse los cambios en los indicadores hidrológicos (velocidad de la corriente, calidad del agua, niveles de agua de los acuíferos, río y zona de inundación, pérdida de hábitats de flora y fauna acuática y terrestre, así como de especies nativas de las zonas altas, humedales y manglar).

La severidad de la respuesta del posible cambio con la modificación de los caudales se evaluó a través del análisis cuantitativo de los impactos utilizando un rango de valores, según la alteración hidrológica, estado de los acuíferos, cambios en la geomorfología, calidad del agua, contaminación difusa, registros de los incrementos o decrementos en la abundancia y/o densidad de peces, de macroinvertebrados, vegetación de galería, vegetación riparia, hidrófitas y manglares obtenido mediante la fórmula modificada sugerida por Bojórquez (1989), para cada indicador específico de cada disciplina, como en el ejemplo de la Tabla 4.9.3.

Tabla 4.9.3. Ejemplo de matriz de datos para los indicadores, condición actual, tendencia, evaluación de impactos (ecuación 1) y estrategias de mitigación para los caudales ambientales en el Río Verde (Oaxaca).

Indicadores de caudal ambiental	Condición actual	Tendencias	Cambios	N	I	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MO	IA	Mitigación
Caudales extremos bajos																
Caudales bajos																
Caudales altos																
Pulsos de caudal altos																

Indicadores de caudal ambiental	Condición actual	Tendencias	Cambios	N	I	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MO	IA	Mitigación
Pequeñas inundaciones																
Grandes inundaciones																

$$IA = \pm (3I+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC) \quad (1)$$

IA Impacto ambiental.

N= Naturaleza: benéfica o perjudicial (±).

I = Intensidad: grado de incidencia (máximo valor 12).

EX = Extensión: radio de 10 km = parcial.
 Extenso = para una o varias comunidades (SAR).
 Crítico = todo el Sistema Ambiental Regional.

MO= Momento: plazo de manifestación del efecto.

PE= Persistencia: <1 año = fugaz; 1 y 10 años = temporal; + de 10 años = permanente.

RV= Reversibilidad: posibilidad de reconstrucción.

SI= Sinergia: reforzamiento de efectos simples.

AC= Acumulación: incremento progresivo.

EF= Efecto: directo-primario, indirecto-secundario.

PR= Periodicidad: intermitente o discreto, periódico o estacional.

MC= Recuperabilidad (+), Irrecuperabilidad (-).

Los impactos fueron marcados en mapas de la región de estudio, utilizando una escala de severidad de la respuesta con valores que pueden estar dentro del rango de 13 a 76. Esta evaluación de impactos fue obtenida con la Ecuación (1) y puede indicar el abatimiento del estado de salud del ecosistema fluvial cuando el resultado es alto, en relación con la escala de color y símbolos en el mapa del área de la cuenca: (azul = muy buena condición del sistema, ☆; verde = buen estado, ▲; amarillo = aceptable, ♣; naranja = deficiente, ± y rojo = mala condición, X). Los impactos pueden ser positivos o negativos, en relación con la definición de cada elemento de la ecuación (1) y Tabla 4.9.4. Cada impacto fue emitido por cada experto a través de una evaluación “atributo por atributo”, tomando en consideración la consistencia en las evaluaciones (desviación estándar evaluada por cada experto) y consenso (grado de acuerdo entre los interesados) en forma similar a la metodología Multicriterio utilizada por Bojórquez-Tapia *et al.* (2005) y metodología DRIFT. ^{14, 15, 16} Los ajustes finales fueron trasladados a valores numéricos (evaluación efectuada por los expertos) para facilitar la significancia de las evaluaciones.

Tabla 4.9.4. Escala de valores de la ecuación (1), evaluación de impacto y condición del sistema fluvial en el área de la cuenca.

Estado del sistema	Color asociado	Valor numérico del impacto	Signo
Muy buena	Azul	13 - 26	+ , -
Buena	Verde	27 - 39	+ , -
Aceptable	Amarillo	40 - 52	+ , -
Deficiente	Naranja	53 - 65	+ , -
Mala	Rojo	66 - 76	+ , -

Para evaluar el impacto, el área de estudio fue dividida en varios segmentos considerando los cambios en la estructura del río longitudinalmente (ancho y profundidad río abajo), por el incremento del área de drenaje y descargas:

- 1) área inundada por la presa. Segmento caracterizado por presentar altas pendientes y perfil en forma de V dentro del valle. Presencia de rápidos y cascadas,
- 2) segmento que comprende la presa con cambio de régimen (PCR), erosión alta por la pendiente e influencia de la precipitación,
- 3) segmento de la PCR a la derivadora Ricardo Flores Magón (RFM), o zona de transferencia que recibe material de la erosión, caracterizada por una zona de inundación amplia y patrones meándricos en el canal del río,
- 4) segmento de la derivadora RFM a la boca del río, con poca elevación y meandros; un valle plano con una zona de deposición como proceso dominante,
- 5) la laguna de Chacahua, a 5 km, ubicada al lado izquierdo de la boca del río,
- 6) Lagunas del Espejo y Minuyua a 1.47 km del lado derecho del río, y
- 7) confluencia del Río La Leche-Río Verde en la parte alta del Río Verde, considerada solamente por algunas disciplinas (Figura 4.9.2).

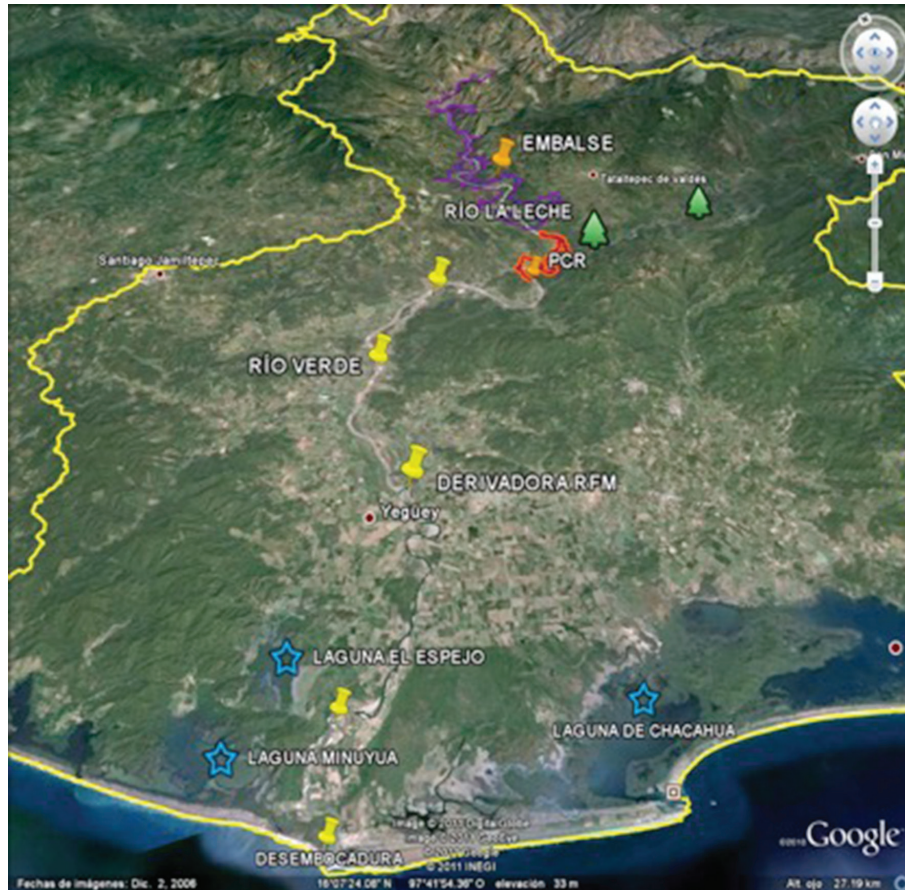


Figura 4.9.2. Cuenca y segmentos del río considerados para los estudios multidisciplinarios en el Río Verde, así como para la determinación de los caudales ambientales, identificación de impactos y medidas de mitigación.

4.9.3.3. Resultados

Análisis comparativo de los caudales ecológicos proyectados para el Río Verde, Oaxaca

Las metodologías generaron varias opciones de regímenes de caudal para mantener las condiciones ecológicas del río. Los resultados de las curvas de duración de los caudales y los caudales ambientales, en combinación con la información multidisciplinaria, fue utilizada para determinar la mejor estrategia de caudales para abatir el impacto ambiental y aplicar el mejor criterio para el manejo racional de la presa.

Los caudales ambientales calculados mediante Tennant modificado, *IHA*, Preferencia de Hábitat e *IFIM-PHABSIM* son bastante similares para los caudales extremos bajos, caudales bajos y pulsos de caudal alto. Mientras el *IHA* y Preferencia de hábitat coinciden para los caudales altos. El método de Tennant modificado tiende a asignar caudales más altos para pequeñas y grandes inundaciones. Por su parte, el *PHABSIM* calculó los valores más conservadores para los pulsos de caudal altos y pequeñas inundaciones, característica que debe considerarse cuando las condiciones de manejo del río sean restrictivas (Tabla 4.9.5, Figura 4.9.3).

Tabla 4.9.5. Análisis comparativo de los caudales ecológicos utilizando el método de Tennant modificado, IHA, Preferencia de hábitat, Simulación del hábitat y los registros históricos de las descargas de 42 años de dos estaciones hidrométricas del Río Verde, Oaxaca.

Caudal (m ³ /s)	Tennant modificado	Hidro periodo (IHA)	Preferencia de hábitat	Simulación del hábitat PHABSIM
C. Extremos bajos	16.05	12.75	20	30
C. Bajos (secas)	32.1	63.9	70.15	53
C. Altos (lluvias)	48.15	251.88	250.39	260
Picos extraordinarios	462.61	457.35	500	350
Pequeñas inundaciones	1 000	548.52	600	630
Grandes inundaciones		3 000		4 000

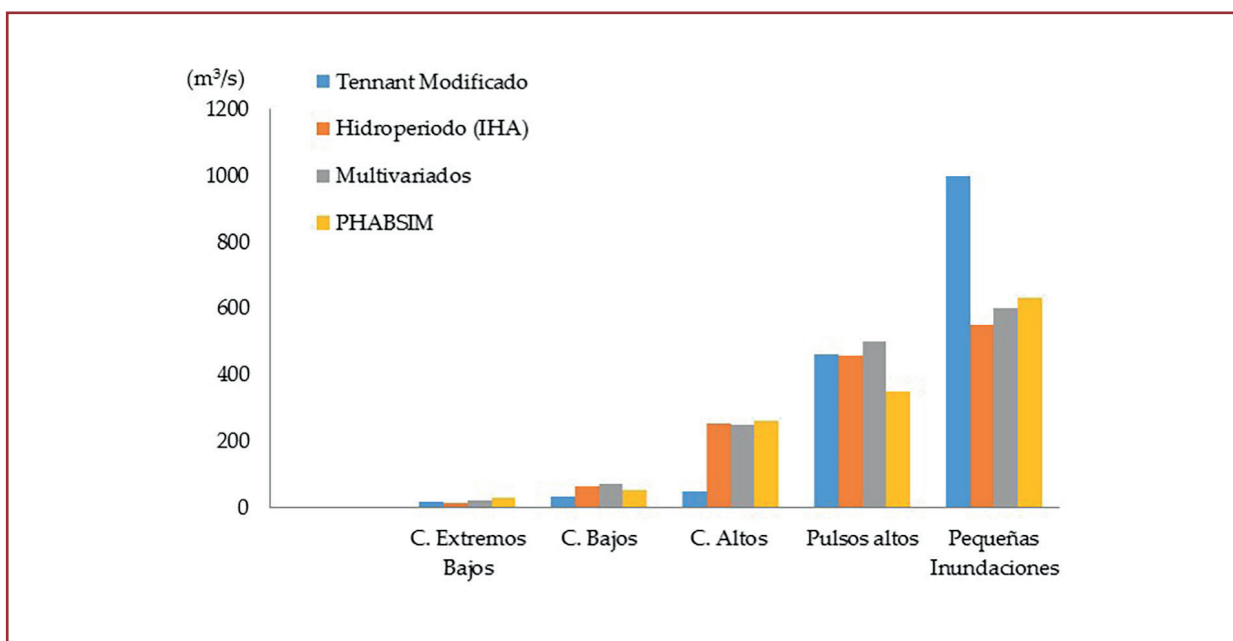


Figura 4.9.3. Análisis comparativo de los caudales ecológicos utilizando el método de Tennant modificado, IHA, Preferencia de hábitat, Simulación del hábitat y los registros históricos de las descargas de 42 años de dos estaciones hidrométricas del Río Verde, Oaxaca.

Estrategia de caudales para el Río Verde, Oaxaca. Los análisis y resultados de las cuatro metodologías aplicadas sugieren considerar los rangos para cada grupo de caudales, con el propósito de obtener márgenes de operación o de manejo de la presa cuando las condiciones ambientales generen años secos (valor más bajo

del rango en el grupo de caudales) y años húmedos (o valor más alto para cada grupo de caudales, Tabla 4.9.6). El régimen propuesto está acorde con los estudios multidisciplinarios relacionados con el comportamiento hidrológico e hidrodinámico natural del río, para conservar la cantidad de agua en el acuífero y mantener la conectividad

entre las lagunas Lávalo, Espejo, Minuyua y Chacahua, y la zona de inundación, humedales y la desembocadura, y conservar la calidad del agua

y los hábitats de la vegetación (bosque de galería, hidrófitas y acuáticas), peces, macroinvertebrados y zona costera (Tabla 4.9.6 y 4.9.7).

Tabla 4.9.6. Caudales ambientales calculados a través del método de Tennant modificado, IHA, Preferencia de hábitat y Simulación del hábitat; así como rangos de caudal sugeridos para el manejo de la presa durante los años secos y húmedos.

Grupo	Caudal (m ³ /s)	Duración y época
C. Extremos bajos	12.75-30.0	15 días en abril.
Caudales Bajos	32.1-70.15	Noviembre-mayo.
Caudales Altos	48.15-260	Junio-octubre, alternar pulsos de caudales altos.
Pulsos Altos	350-500	Julio y agosto (5-15) en primeros días de sept.
Pequeñas inundaciones	548.52-1 000	Durante septiembre.
Grandes inundaciones	3 000-4 000	Primeros días de septiembre (tercero o quinto día).

El esquema de caudales ambientales propuesto es consistente con la aplicación de los análisis multicriterio y estudios multidisciplinarios efectuados a los resultados, con relación al comportamiento hidrológico e hidrodinámico natural y con los hábitats analizados en el Río Verde, como puede ser observado en los resultados de:

- 1) el modelo hidrológico proyectado que muestra una descarga mínima instantánea promedio 7.4 m³ s⁻¹ en abril y una descarga máxima instantánea promedio de 4 065 m³ s⁻¹ en octubre, que coincide con los requerimientos de caudal ambiental en el río,
- 2) el modelo hidrodinámico proyectado concuerda con los caudales ambientales y las descargas naturales del río para las descargas de retorno, formativas, de máxima ribera, de inundación para diferentes años y diferentes segmentos del

río con relación a los sistemas asociados (lagunas, Tabla 4.9.7),

- 3) los estudios de aguas subterráneas señalan que el sistema se encuentra en balance con el régimen de caudales naturales actuales, aportes de la lluvia, actividades de irrigación, bombeo, evaporación y flujo base, y la aplicación de los caudales ambientales proyectados para el río. Los caudales señalados en la Tabla 4.9.7 generarán las condiciones para mantener la calidad y cantidad de los acuíferos en el área de la cuenca,
- 4) también se consideraron a las comunidades de peces y macroinvertebrados en el cálculo de los caudales ambientales, mediante análisis Multivariados para estudiar la Preferencia de hábitat (Cluster, Componentes Principales y Análisis de Discriminantes Canónico), así como el análisis de Simulación del hábitat (IFIM-

PHABSIM, Tabla 4.9.6), que coincidieron con los caudales ambientales proyectados,

5) las comunidades de flora (vegetación acuática y terrestre del cauce, corredor

fluvial, manglar y bosque) y fauna demuestran que los caudales ambientales proyectados son apropiados para mantener las condiciones de humedad necesarias para su conservación.

Tabla 4.9.7. Requerimientos hidrológicos de caudales para mantener las condiciones morfométricas y sedimentológicas del cauce.

Evento	Caudal (m ³ /s)
Avenidas ordinarias que inundan	400-900
Gasto formativo	1 000
Gasto formativo 1.4	900
Gasto formativo 2.0	1 006.85
Gasto formativo 5.0	1 406.11
Gasto de retorno 1 a 4 años	2 112.87
Gastos a nivel de rivera máxima (P. Reina)	900
Gastos a nivel de rivera máxima (derivadora)	500
Gastos a nivel de rivera máxima (desembocadura)	1000
Gastos de alimentación para la laguna El Espejo	1 000-1 100
Gastos de alimentación para la laguna Lávalo	350
Gasto medio de desborde (desembocadura)	455.8
Gasto medio de desborde (Huichicata)	1 694.6
Avenidas por ciclones	400-3 334
Gastos máximos de desborde-bordo de protección	4 065

La información de la cuenca del río se obtuvo mediante los análisis cuantitativos de las disciplinas mencionadas para cada indicador de impacto (topografía, suelo, hidrología, hidrodinámica, agua subterránea, calidad del agua, distribución de la vegetación, uso del suelo, contaminación difusa, caudales ambientales,

flora y fauna acuática y terrestre del cauce y del corredor fluvial), de los impactos y sus medidas de mitigación incluidos en la Tabla 4.9.8, considerando cada segmento del río y los módulos biofísico y social del sistema y la información de las matrices de datos, como fueron previamente indicadas en el ejemplo de la Tabla 4.9.3.

Tabla 4.9.8. Evaluación de impactos y medidas de mitigación obtenidas de los módulos biofísico y social para cada segmento del Río Verde (Oaxaca).

Segmento	MÓDULO BIOFÍSICO
1º y 2º, presa y PCR	Se observarán impactos en los caudales naturales y cambios en la biodiversidad. Es necesario considerar las medidas de compensación para las áreas de inundación, en relación con la conservación de la biodiversidad. Se recomienda la generación de invernaderos rurales de especies nativas de plantas. Son recomendables estudios sobre las comunidades de flora y fauna. Tienen que implementarse el manejo de las especies nativas de peces y las alternativas para la conservación de la biodiversidad en las áreas de inundación.

Segmento	MÓDULO BIOFÍSICO
<p>3° PCR-derivadora (27.780 km)</p>	<p>Los caudales extremos bajos de 12.75 a 30 m³ s⁻¹ serán modificados por la presa. Los caudales medios mensuales y diarios naturales observarán un incremento en la época de secas y un decremento en la temporada de lluvias. Si se conservan los caudales ambientales en este tramo, se mantendrán en forma aceptable las características morfométricas y sedimentológicas del cauce. Se recomienda la protección de las márgenes del río contra la erosión a través de enrocamientos. Para el agua subterránea la tendencia y condición actual son las naturales, con mediana modificación por la interacción benéfica en la parte baja del río y el acuífero en la época de secas, y a las políticas de operación de la futura presa. Se alterará la calidad del agua en los primeros metros posteriores a la cortina de la PCR (O₂, temperatura y SST); 537 ejemplares de ocho especies, pertenecientes a cinco familias en la parte alta del río, y un total de 760 ejemplares de 17 familias para la parte baja señalan a la derivadora como una barrera para la migración de especies anádromas, diádromas y catádromas. Las hidrofítas se mantendrán con los actuales usos de la tierra (agricultura y pastoreo), así como la conectividad, vegetación acuática y riparia. Se propone la generación de prácticas agropecuarias adecuadas y la recuperación del corredor fluvial.</p>
<p>4° Derivadora-Boca (– 21.780 km)</p>	<p>Entre Charco Redondo y la desembocadura, se espera un incremento pequeño en el almacenamiento de agua en los acuíferos debido a la influencia favorable con el incremento de los caudales extremos bajos en la época de secas (75m³ s⁻¹ de caudal mínimo). Se mantendrán las condiciones fisicoquímicas favorables para el desarrollo de las especies acuáticas animales y vegetales, así como de la ribera, si se aplican los caudales ambientales proyectados. Las especies favorecidas con la construcción de canales comunicadores en la derivadora río arriba y río abajo serían las especies migratorias de maroinvertebrados (<i>Macrobrachium</i> sp) y del pez <i>Agonostomus monticola</i>. Las especies de peces que pudieran repoblar la parte alta del río serían <i>Awaous transandeanus</i>, <i>Centropomus</i> sp, <i>Oerochromis mossambicus</i>, <i>Dormitator latrifons</i>, <i>Astyanax aeneus</i>, <i>Sicydium multipunctatum</i>, <i>Gobiomorus maculatus</i>, <i>Agonostomus monticola</i>, <i>Poecilia sphenops</i>, <i>Pomadasys bayanus</i> y <i>Mugil curema</i>. El mayor deterioro o impacto sobre las hidrofítas los ejercen las prácticas agropecuarias. Los caudales ecológicos mantendrán el balance de salinidad entre el mar y el río, manteniendo la comunidad del manglar en la desembocadura. Los caudales extremos bajos de 12.75 a 30 m³ s⁻¹ en este segmento del río pueden ser recuperados utilizando la derivadora. Las condiciones fisicoquímicas del río serán favorables para el desarrollo de la fauna y flora del canal, si se aplican los caudales ambientales.</p>
<p>5° y 6° Boca y lagunas.</p>	<p>Los caudales ecológicos mantendrán las condiciones hidrológicas de las lagunas y la desembocadura del Río Verde, incluyendo el manglar y el balance de agua dulce y salada entre el río y el mar.</p>

MÓDULO SOCIAL. Impactos y medidas de mitigación	
<p>Segmento 3°, 4°, 5° y 6°</p>	<p>Desechos de la agricultura y la agricultura de riego. Las tendencias en este rubro serán las mismas, ya que actualmente está subutilizada. Para la agricultura de temporal y para la agroindustria, con una tendencia a permanecer como actualmente se encuentra; sin cambios, ya que existe una concesión de agua. Se sugiere la formación de un corredor fluvial o protección de ribera, prácticas de manejo agropecuario adecuadas para el control de la contaminación, el funcionamiento de la planta de tratamiento para la procesadora de limón y la implementación de la agricultura orgánica para la conservación del ambiente. De la agricultura de temporal se espera un decrecimiento por el cambio a la agricultura de riego. Para las actividades pecuarias con riego de temporal, la tendencia es hacia la transformación al riego tecnificado y para la superficie sembrada.</p>

4.9.3.4. Discusión

Se utilizó la metodología DRIFT para la integración multidisciplinaria de la información obtenida del Río Verde, Oaxaca, con relación a la evaluación y proyección de los caudales ambientales para las estaciones seca y húmeda, en el proyecto de presa y como medida de mitigación de los impactos ambientales cuando la presa comience a funcionar. Esta metodología también es utilizada para: describir las consecuencias de la alteración parcial o total de cada uno de los diferentes componentes del caudal ambiental; la creación de una base de datos biofísicos detallada del río con relación a las consecuencias de la alteración del caudal; describir cómo cambiarán las condiciones del río con cualquier combinación futura de caudales altos o bajos, así como las implicaciones sociales de los posibles cambios en el río. El análisis multidisciplinario junto con los estudios previos generaron los escenarios de caudal ambiental, la determinación de una cierta condición de estado ecológico para el río y las especies analizadas; los efectos que tiene el régimen de caudal modificado en los usuarios del río y las evaluaciones de impacto, medidas de mitigación y planes de manejo de la cuenca.

Los resultados del régimen de caudales obtenido a través de las cinco metodologías señalan los escenarios para cada grupo de caudales en la estación seca y lluviosa (o años secos y lluviosos).

Caudales extremos bajos. Por un periodo de 15 días en la época de secas (abril) de 12.75 a 30 m³ s⁻¹, mínimo recomendable para mantener el hábitat a nivel de sobrevivencia a corto plazo para la mayoría de las formas de vida acuáticas. Para que el ancho del cauce a nivel del espejo de agua, profundidad y velocidad de la corriente no se

reduzcan significativamente por mucho tiempo, y para que el hábitat acuático no se degrade, como ha sido observado en otros ecosistemas por Arthington *et al.* (2006) y Poff (1966).

Caudales bajos. Mínimos óptimos entre 32.1 y 70.15 m³ s⁻¹, de noviembre a mayo (época de secas), a fin de mantener un hábitat adecuado para: la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuáticas, ya que el ancho de la superficie libre del agua, profundidad y velocidad serán generalmente satisfactorias; que las temperaturas del agua no resulten limitantes en el desarrollo de la vida acuática en la mayoría de los segmentos del río; que la vida de los invertebrados no se convierta en un factor limitante en la producción pesquera y para que se mantengan los niveles de agua, oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua, como ha sido observado en otros ecosistemas.^{14, 15, 49, 95} Los estudios de Preferencia de hábitat (análisis Multivariado) y Simulación del hábitat (IFIM-PHABSIM) para los macroinvertebrados y peces, señala que las especies favorecidas con estos caudales en la parte alta del río serían *Cichlasoma trimaculatum*, *Astyanax aeneus*, *Poecilia sphenops*.

Caudales altos. Entre 48.15 y 260 m³ s⁻¹, durante la época de lluvias (septiembre), con una variación que simule la magnitud del hidropereodo para la zona de estudio. Estos caudales propiciarán la distribución de las comunidades de plantas en las charcas, planicie de inundación y humedales; asimismo, se liberará de desechos y se propiciará el aireamiento de los sedimentos de los canales y zonas de desove; se incrementará el acceso a los hábitats específicos para la reproducción, crianza y refugio de depredadores; se generarán espacios para el desove y la migración; se

generarán condiciones para cubrir las estrategias de las historias de vida y los mecanismos de comportamiento específico para cada especie.^{6, 7, 8, 61, 93, 95, 96, 101} Las especies favorecidas con estos caudales serían *A. monticola*, *S. multipunctatum*, *A. transandeanus*, *A. aeneus*, asociadas a sitios profundos, con alta concentración de oxígeno y temperaturas más elevadas.

Pulsos de caudal altos. De 350 a 500 m³ s⁻¹ en lluvias para: la preservación de la ribera; generar los caudales que conservarán la forma física del cauce, incluyendo los rabiones y pozas, así como de los canales laterales del río; remover sedimentos de arena, grava y rocas; prevenir la invasión de vegetación de la ribera dentro del canal; restaurar la calidad del agua después de los periodos de caudales bajos, así como de contaminantes y basura, y mantener las condiciones de funcionalidad de los estuarios en forma coincidente con Bovee (1986), Gustard (1992), Jhonson (1997), Brown y King (2003a y b), y King *et al.* (2003).

Pequeñas inundaciones. De 548.52 a 1 000 m³ s⁻¹, al menos cada dos años, durante septiembre, para la conservación de la morfología del río, conectividad con humedales, canales laterales, zona de inundación, limpieza y balance de sales en la zona costera.^{18, 55, 94}

Grandes inundaciones. De 3 000 a 4 000 m³ s⁻¹ por tres días cada diez años, para la conservación de los ecosistemas asociados (lagunas Lávalo y Chacahua).

Los caudales ambientales, por si solos, no son una descripción suficiente del estado de salud de los ríos. Deberán ser considerados en combinación con otras medidas de mitigación complementaria, tales como: evaluación de

la calidad del agua en combinación con las pertinentes medidas de manejo y conservación de la cuenca.^{14, 56, 71, 95}

Las presas alteran la magnitud y frecuencia de los caudales, abatiendo la capacidad de transporte de los sedimentos, que deben ser monitoreados constantemente para el manejo apropiado del río.^{31, 70, 86} La retención de los sedimentos y alteración de los caudales naturales río abajo han causado la pérdida y acumulación de sedimentos en la base del canal, modificando los hábitats para las diferentes especies de plantas y animales acuáticos.⁵⁸ Por lo tanto, se sugiere el monitoreo constante para el manejo de los sedimentos en el río, como ha sido señalado por Poff *et al.* (1997), Arthington *et al.* (2006) y Richter *et al.* (2006), en otros ecosistemas. Los parámetros ambientales que determinan la estructura de los hábitats y comunidades, y las preferencias ambientales de las especies en este estudio, fueron utilizados para predecir el efecto del cambio en las características de los caudales en la flora y fauna del río, así como para generar las estrategias de manejo que a continuación se mencionan:

- Para la zona de inundación del embalse y presa en cambio de régimen, se requiere el manejo de las especies nativas y la conservación de la biodiversidad (32.25 km).
- El ajuste de los caudales ambientales en las estaciones seca y húmeda cuando la presa comience a operar (caudales extremos bajos, caudales bajos, caudales altos, pulsos de caudal altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones), para conservar la geometría del canal, composición y cantidad de los materiales del fondo, condiciones hidráulicas y variaciones de corriente, retención de

sedimentos y distribución de la flora y fauna (terrestre y acuática) a lo largo de 50.38 km de río (de la presa a la desembocadura).

- Es necesario mantener el nivel mínimo de agua para la zona de inundación, con la finalidad de conservar la cobertura vegetal del corredor fluvial y de la zona de inundación, el depósito de nutrientes, el balance de especies acuáticas y terrestres, el reclutamiento de plantas colonizadoras, la forma física del canal, los hábitats y los depósitos de grava y sedimento en las zonas de desove.
- Se requiere de la evaluación continua de las conexiones a lo largo del río, así como la evaluación de las condiciones de migración y zonas de desove, en relación con los periodos de caudales, fases y ciclos de vida de los peces y otros vertebrados.
- El desarrollo de planes de monitoreo para medir los cambios en la geometría del canal, características de los sedimentos, composición de los materiales del lecho del río, condiciones hidráulicas de los caudales que se requieren cuando la presa comience a funcionar y cuando los caudales ambientales sean implementados.
- Construcción de rutas de migración (canales artificiales) para que las especies de *Agonostomus monticola* y *Macrobrachium* sp. puedan migrar río arriba, hasta aproximadamente 1 500 msnm.
- Es necesario mantener la estructura de la comunidad en el río, el cual actúa como reservorios de especies.
- Generar estudios para predecir con certeza el efecto generado por los cambios en las características hidrométricas en la ictiofauna del río.

Los cambios en los caudales pueden afectar las condiciones en los bienes y servicios que provee el río. La función amortiguadora de la zona de inundación modera el abatimiento de la corriente y efectos indeseables, como: fluctuaciones bruscas en el nivel de la superficie del agua en el canal, corrientes y humedales, que pueden causar su erosión y destrucción de la vegetación nativa al incrementar las inundaciones.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95} Las raíces de la cubierta vegetal en la zona de inundación son útiles para retener sedimentos de las orillas y humedales. El incremento de sedimentos contribuye a la estabilidad de las orillas; asimismo, la vegetación y desechos vegetales reducen la velocidad de la corriente, abatiendo la erosión.^{8, 32, 36, 59} El abatimiento de la velocidad del agua también promueve el depósito de sedimentos necesarios para la creación de bancos en el cauce del río. La zona de inundación o *buffer* también protege la vegetación nativa de las orillas y humedales. La vegetación nativa de las orillas de los ríos es una fuente de alimento y protección para los peces y otros organismos.^{9, 52.} Cuando la vegetación nativa es destruida por las fluctuaciones extremas en los caudales y en los niveles de agua, las especies vegetales de plantas exóticas y nocivas pueden establecerse rápidamente en estos lugares, generando el detrimento de las condiciones de la vida silvestre dependiente de la vegetación nativa para la alimentación y crianza.^{38, 92, 95} Los peces, ranas y aves son una fuente de proteína. Algunas especies de plantas y hierbas de la zona riparia, e hidrofitas del canal, pueden proveer nutrientes y medicinas a la población. Los árboles del corredor fluvial proveen materiales para la construcción y combustibles para los hogares. Asimismo, el río puede cumplir con aspectos de recreación, culturales y religiosos de las comunidades aledañas.^{14, 15, 16, 18, 83, 93, 95}

La aplicación de la metodología DRIFT representa el uso de la técnica multicriterio, como auxiliar inherente en la toma de decisiones, en los estudios multidisciplinarios y en las evaluaciones del caudal ambiental e impacto ambiental. También esta metodología toma en consideración los beneficios y costos sociales del cambio en las condiciones del río, particularmente de los usuarios (o población en riesgo) de los recursos del río. Sin embargo, esta metodología no provee un caudal ambiental recomendado. Más bien, genera objetivos basados científicamente en las consecuencias de los cambios de caudal para un rango de posibilidades. Esto permite a los directivos generar una estrategia de decisiones para el uso equilibrado del agua. En el Río Verde, fue una metodología para el manejo de los datos y elaboración de un plan estructurado con base en la información biofísica generada.^{14, 15, 16} Los objetivos de manejo de la metodología DRIFT incluyen: el abatimiento de las pérdida de hábitat naturales para el futuro; la reducción de impactos generados por las fuentes puntuales y no puntuales de contaminantes; asegurar las fuentes de agua, y mejorar la eficiencia del uso del agua, protegiendo los humedales, zonas de almacenamiento y la recarga de las aguas subterráneas en forma coincidente con la metodología de la evaluación ambiental, donde el proceso integrativo de identificación y

evaluación del módulo biofísico, social y otros efectos relevantes del desarrollo anteriores a las evaluaciones de impacto son utilizados para la toma de decisiones mayores.

La evaluación de los caudales ambientales es esencial en las evaluaciones de impacto en el caso de los proyectos de desarrollo. La alteración del régimen de caudales en los ríos siempre mantendrá una condición de impacto potencialmente severa. Estos impactos pueden frecuentemente ser mitigados a través del diseño de los caudales ambientales o caudales de compensación, a través de la sustitución de recursos o programas de desarrollo de las comunidades.^{5, 6, 7, 8, 14, 15, 16} Acorde con De Smedt (2010), es necesario elaborar iniciativas específicas con relación a las herramientas de evaluación de los caudales ambientales e incluir la colaboración estrecha de investigadores y tomadores de decisiones para las evaluaciones de los impactos ambientales en forma satisfactoria y la apropiada combinación de las herramientas científicas involucradas; iniciativas que deben incluir el diálogo entre las dos comunidades en la fase de formulación de objetivos ambientales. La colaboración entre investigadores y tomadores de decisiones involucra un enfoque que puede ser considerado de frontera, al conectar la ciencia y la política en el marco del desarrollo sustentable operacional.

5

DESAFÍOS PARA LOS CAUDALES AMBIENTALES Y LA SUSTENTABILIDAD DE LOS ECOSISTEMAS FLUVIALES



Río Verde, Oaxaca.

Arthington *et al.* (2006) señalan que los conflictos en la población por el uso del agua se han incrementado rápidamente en el ámbito global, y en materia de cambio climático representa una nueva incertidumbre con respecto a la variabilidad de los caudales en los ríos que potencialmente conduce a un incremento en el recelo sobre el manejo del agua y el estrés que se le impone al ecosistema. Se

acepta, actualmente, que está en la sociedad el interés por conservar los ríos y otros sistemas de agua dulce y reconocer a los legítimos usuarios del agua.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

Sin embargo, no es nuevo el reconocer que los ríos y humedales adyacentes necesitan agua de calidad para sostener los procesos ecológicos y servicios asociados que prestan a la sociedad. Los

científicos reconocen que la determinación del caudal mínimo es arbitraria e inadecuada, porque la estructura y función de un ecosistema fluvial y muchas otras adaptaciones de la biota son dictadas por variaciones de patrones temporales en los caudales de los ríos (el paradigma del régimen de caudal natural).^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95} Existe un acuerdo general entre científicos, y muchos operadores, que para proteger la biodiversidad de las aguas dulces y mantener los bienes y servicios esenciales que proveen los ríos, se necesita simular los componentes de variabilidad del flujo natural, tomando en consideración la magnitud, frecuencia, duración, periodicidad, tasa de cambio y predictibilidad de los caudales (avenidas y secas), y la secuencia de tales condiciones.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95} El desarrollo de un plan de manejo de caudales ambientales defendible, necesita incorporar una apreciación esencial de los patrones naturales de variabilidad de los caudales y efectuar un proceso de calibración fehaciente del comportamiento de los caudales con información biológica empírica y científica. Los caudales ambientales pueden ser cuantificados de muy diferentes formas, y con una variedad diferente de criterios.^{5, 6, 7, 14, 15, 16, 17, 18}

En un sistema fluvial específico, primero se puede utilizar un proceso de manejo adaptativo para establecer los caudales base sobre la variabilidad natural del caudal, con la información hidroecológica disponible y la opinión de un experto que pueda validar con datos de campo y establecer para sitios específicos las condiciones ecológicas o puntos críticos de salud del ecosistema. Esta aproximación es más apropiada para ríos que tienen un interés científico o social (proyectos de restauración), o para grandes sistemas fluviales que son únicos.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95} Por lo tanto, el propósito es más bien intentar el manejo de la generalidad o determinar el régimen de caudal

natural para muchos ríos individuales, o sea, identificar ciertas clases de ríos basándonos en ciertos atributos de baja variabilidad y, entonces, calibrar las relaciones entre las alteraciones en cada caudal en específico y sus condiciones ecológicas medibles.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

Realmente, la biota acuática y riparia de un río o corriente no tiene que estar adaptada exclusivamente a un río en específico; puede efectuarse una cierta generalización para diferentes tipos de variabilidad de caudal que generan ciertas condiciones ecológicas en las comunidades y diferentes estrategias de historia de vida en las especies (aunque esto implica un conocimiento detallado de la región de interés).

Acorde con la clasificación de los ríos en grupos ecológicamente coherentes, se pueden generar unidades de manejo prácticas (distintas clases de ríos para los cuales existe un rango natural específico de variación hidrológica y biótica). La clasificación hidrológica del río con fundamento estadístico, combinado con el análisis ecológico calibrado, es particularmente adecuada para el desarrollo de una guía de caudales ambientales científicamente defendible a escala nacional y regional, en la cual prevalezcan las mismas condiciones climáticas, fisiográficas y ecológicas. Dentro de una región, las características ecológicas de una corriente/río de una cierta clase hidrológica se espera que sea relativamente similar a otra comparada con otras características ecológicas entre clases. Por lo tanto, estas clases representan distintas unidades para el manejo de los caudales.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

Brown y King (2003) mencionan que existen cuatro pasos básicos para aproximarse a esta metodología:

- 1) Generar una clasificación para los ríos. Muchas clasificaciones corriente-caudal se sustentan en una variedad de descriptores ecológicos del régimen de caudales naturales. La aproximación básica consiste en identificar las corrientes naturales de una región y determinar datos de caudal remodificados y modelados, así como resumir las variables ecológicas para cada caudal con la finalidad de capturar la variabilidad hidrográfica natural del caudal. Existe mucha flexibilidad en la selección de las variables para los caudales, la forma en que se cuantifican, el método estadístico de clasificación y el número de clases de ríos definidos para una región dada. La magnitud del caudal (anual, estacional, mensual, diaria), frecuencia, periodicidad, duración y predictibilidad (lluvias y secas), la tasa de cambio de una condición de caudal a otra (tasa de variación en los registros hidrográficos) y la secuencia temporal de las condiciones de caudal deben ser incluidas, porque influyen muchos aspectos del ecosistema fluvial. A cada río se le define con un particular peso o subtipo con los caracteres determinantes del caudal utilizados para la clasificación.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}
- 2) La obtención en cada clase de la distribución de frecuencias para caudales variables. El río de referencia dentro de la clase tendrá una distribución de valores para cada caudal definido con ciertas variables/medidas, derivadas de un registro histórico de caudales. Las distribuciones son probablemente variables de una a otra corriente o río, pero cuando

se combinan representan un rango natural de variación espacial y temporal para todos los ríos dentro de esa clase. Si algunas corrientes son desestimadas, el modelaje estadístico puede ser utilizado para estimar los parámetros relevantes para la clasificación regional al utilizar los datos en combinación con la información de la base de drenado, condiciones climáticas, y otro tipo de información de la cuenca. En regiones con densidad de indicadores escasa, los modelos para el balance de agua pueden ser utilizados para generar una resolución temporal burda a través de hidrográficas simuladas (descripciones mensuales o estacionales). Y estos caudales burdos pueden relacionarse con los datos de indicadores de caudales-altos y caudales modificados (*IHA*).^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

- 3) Comparar la distribución de frecuencias para los caudales modificados y las corrientes con respecto a una condición de referencia dentro de la misma clase. La modificación de los caudales tiene que ser definida en términos de una desviación de la condición de referencia para cada clase de río. Primero, un caudal modificado en una determinada corriente debe ser asignado a una clase de régimen de caudal regional, al estimar los parámetros de caudal pre-perturbados y al hacer la asignación con fundamento en el modelo estadístico, o basándose en las características climáticas de la cuenca. Entonces, para cada caudal perturbado, el grado de modificación de cualquiera de sus parámetros puede ser cuantificado con respecto a la condición de distribución de frecuencia para esa clase de referencia.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

4) Desarrollo de relaciones caudal-respuesta para una condición de salud ecológica de referencia y una corriente modificada con cada variación en el caudal. La validación ecológica es imperativa para la aproximación robusta. Una vez que los tipos y grados de modificación en los caudales han sido determinados para ciertas clases de corrientes representativas, el paso crítico y final es el desarrollar las relaciones cuantitativas entre indicadores de la condición ecológica (especies, riqueza específica, biomasa, rasgos, estructura, sucesos de reclutamiento) referenciados a la condición natural y grados de modificación de caudal. Se requiere un muestreo representativo de las interacciones caudal-relaciones ecológicas a través de un gradiente de regímenes de caudales naturales (como referencia), para después compararlos con los perturbados en cada clase de ríos. Al comparar la condición ecológica a lo largo del gradiente de caudales perturbados, los caudales estándar ecológicamente relevantes pueden ser obtenidos y calibrados.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

Es posible generar curvas empíricas de caudal-respuesta para cada condición natural de interés (hábitat, vegetación acuática y riparia, invertebrados, peces, aves acuáticas. etc.) y para cada caudal con una variación relevante definiendo la misma clase de río (descargas y duración de caudales bajos, o magnitud, periodicidad y frecuencia en los caudales de inundación, etc.). Si es necesario, el juicio de

expertos puede contribuir al desarrollo de las curvas de caudal-respuesta. Un punto clave es la forma en que funcionan las relaciones caudal-respuesta. Estas relaciones pueden ser lineales (indicador alto 1), como el decremento de la abundancia o biomasa de peces en meses y años después del abatimiento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones. Alternativamente, el indicador puede ser una simple respuesta umbral (indicador de salud 2), tal como el decremento en el hábitat de humedales debido al abatimiento del caudal en los canales, un resultado típico de la aplicación del *PHABSIM*, o el fracaso en la anidación de peces o colonias de aves acuáticas para la crianza, si los niveles de agua no son mantenidos.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

En forma conjunta, las curvas individuales de caudal-respuesta y los dos niveles de riesgo proveen a los tomadores de decisiones mucha información multidisciplinaria para guiarse al establecer las condiciones de caudal ambiental estándar para una clase de río en particular. Pueden establecerse caudales conservativos, de tal manera que: 1) el grado de modificación de los caudales no exceda el nivel de riesgo de uno, de muchos, o de todos los atributos del ecosistema evaluados como altos, o 2) los inversionistas pueden decidir aceptar un nivel de riesgo de daño ecológico alto al permitir un variación hidrológica en particular, que varíe en alto o relativamente alto grado el rango natural para esa clase de río o corriente.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

Se propone que los dos niveles de riesgo puedan ser registrados como críticos para guiar los repartos de caudal ambiental para cada clase

distinta de corriente. Se definen los mejores y peores escenarios de respuesta ecológica para una modificación de caudales. Este proceso puede ser aplicado a dos tipos de manejo: evaluar las consecuencias ecológicas probables de un rango de escenarios de modificación de caudales para un determinado tipo de corriente dentro de una clase, o establecer las guías para la restauración de los caudales perturbados de una determinada corriente de una misma clase.^{13, 14, 31, 37, 40, 55, 63, 70, 94}

Ventajas de las metodologías holísticas con relación a otros métodos. Las ventajas de la metodología DRIFT consiste en que: 1) es holística, ya que considera los requerimientos de muchos componentes del ecosistema, 2) el método puede ser aplicado a la cuantificación de las consecuencias ecológicas del cambio en cada variación del caudal ecológicamente relevante que define a cada clase de corriente, 3) las curvas de estrés-respuesta validadas ofrecen una forma empírica defendible científicamente para establecer los niveles de riesgo que son posiblemente de los más importantes, así como los muestreos, monitoreos o seguimientos que se necesitan para guiar el reparto de los caudales ambientales, 4) hay alta probabilidad de que el nivel de riesgo 1 protegerá a las especies más sensibles y a los procesos ecológicamente dependientes de la periodicidad de los patrones de descarga de las corrientes, así como un amortiguamiento de caudales blanco para proteger a las especies y a los procesos todavía sin estudiar, 5) la metodología aplicable a diferentes clases de ríos que representen la variación climática sustancial, fisiográfica y las condiciones ecológicas prevalecientes a

escala regional o nacional, y puede entonces generarse una guía de caudales ambientales regionales.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

Una desventaja de esta holística es que no puede aplicarse tan eficientemente cuando muchos de los ríos en una clase hidrológica están sobrepasados por las actividades humanas, y hay pocas oportunidades para calibrar la respuesta ecológica a los gradientes de alteración de caudal existente. En tales circunstancias, es factible emplear métodos como DRIFT, que se aproximan al ecosistema a través del conocimiento de expertos que describen un rango para los caudales bajos que probablemente tienen consecuencias en las alteraciones hidrológicas propuestas.^{14, 15, 16} Aún DRIFT se considera particularmente útil cuando hay pocos datos de tipo ecológico o existe poca información sobre las relaciones ecológicas-hidráulicas para un río en particular; la aproximación que se efectúa es científicamente más defendible, ya que se fundamenta en las relaciones de estrés-respuesta analizadas y validadas, que indican el riesgo del daño ecológico para los caudales que son alterados –con una cierta magnitud– dentro y entre clases de ríos con una hidrología específica. El desarrollo de una guía para el manejo de los caudales validada científicamente para distintas regiones ecológicas y fisiográficas del mundo podría generar una contribución mayor a la resolución de los conflictos sobre los recursos acuáticos compartidos, y por lo tanto, ayudar a asegurarle a la sociedad la continuidad de los beneficios de la biodiversidad y bienes ecológicos esenciales, así como los servicios que proveen los ecosistemas fluviales.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}



Río Verde, Oaxaca (Fotos: Luis Bravo I.)

6

COMENTARIOS



Río Verde, Oaxaca.

La canalización de los ríos, la agricultura, el drenaje, la regulación de las corrientes, la degradación y la contaminación modifican la fisicoquímica y composición de las comunidades bióticas, originando el decremento de la biodiversidad en el ecosistema. El estudio sistémico de los recursos acuáticos es prioritario debido a su deterioro y a su creciente demanda. La conservación de la calidad del agua, manejo sustentable y mantenimiento de la biodiversidad con el mínimo de impacto humano, solo es posible a través de la utilización racional de los recursos.⁵⁸

Los organismos utilizan diferentes hábitats, de acuerdo con ciertas características hidráulicas fisicoquímicas, y sus preferencias pueden ser evaluadas mediante su presencia o ausencia. La evaluación del hábitat de las especies es importante para generar modelos que determinen el efecto temporal y espacial de los cambios en las comunidades.³⁸ La simulación del hábitat y su correlación con los parámetros fisicoquímicos y biológicos permiten la cuantificación del hábitat para diferentes especies de flora y fauna acuática y terrestre.^{49, 64} La cuantificación del hábitat físico es fundamental para la caracterización,

conservación y recuperación de los ríos.⁸⁸ Es indispensable conocer las preferencias de hábitat de las especies para generar modelos que representen adecuadamente las condiciones del medio y, con ello, determinar el flujo mínimo indispensable (caudal extremo bajo), flujo mínimo óptimo (caudal bajo), caudal máximo óptimo (caudal alto), así como las pequeñas y grandes inundaciones de la corriente de los ríos para la conservación del hábitat y biodiversidad.^{13, 95}

En la evaluación del hábitat se deben considerar todos los requerimientos de los diferentes estadios de desarrollo de las especies, pero cuando esto es prácticamente imposible, suele trabajarse con organismos integradores de información, como son los peces.^{13, 50} Los peces son un sensor crítico de integridad a diferentes escalas y, por lo tanto, una herramienta adecuada de análisis. La estructura de la población de peces (abundancia relativa) proporciona suficiente información sobre el estado general del ecosistema ripario.^{64, 88} La protección, conservación, restauración y manejo de los ríos requiere el conocimiento de las demandas ecológicas más importantes de las especies.⁴¹

En todo el mundo, principalmente en las ciudades, hidroeléctricas e industria, se han identificado crecientemente los conflictos por el insuficiente suministro de agua.¹⁴ Al mismo tiempo, se observa una mayor conciencia en relación con la necesidad de dedicar una porción de agua de los ríos para el mantenimiento e integridad de los lagos, ríos y acuíferos que benefician a las comunidades y economías.³² Para propiciar el desarrollo de la población humana y al mismo tiempo proteger y restaurar los ecosistemas naturales, los gobiernos tienen que generar métodos para el manejo eficiente e integrado de los recursos acuáticos. La rehabilitación de la hidrología e integridad

ecológica de los ríos impactados por presas deben ser de interés primario.⁹⁵

La inclusión del ecosistema dentro de la planeación del recurso agua ha sido difícil por la dificultad, costo y tiempo requeridos para determinar la cantidad y frecuencia de los caudales ambientales necesarios para mantener las especies, función y resiliencia de los ecosistemas acuáticos, así como el bienestar de los pobladores que dependen de los ríos.^{14, 15, 16} La ventaja de la determinación de los caudales ambientales consiste en que los tomadores de decisiones conocen cuánto del remanente del caudal puede ser utilizado para usos poblacionales, y cuánta alteración en los patrones de flujo natural de los ríos ha sido inducido por el consumo humano. Por lo mismo, determinar los caudales ambientales es una tarea indispensable en la planeación sustentable del agua.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

No obstante, de la existencia de más de doscientos métodos para la determinación de caudales ambientales, hasta ahora ninguno ha sido aplicado en una escala regional con la finalidad de efectuar el manejo de los recursos acuáticos. Sin embargo, numerosos autores señalan que las metodologías holísticas son más apropiadas que las de Simulación del hábitat, particularmente para los países en desarrollo, debido a la necesidad de enfocarse a la protección de los recursos dentro de un marco ecosistémico, y de la fuerte dependencia para la subsistencia y generación de bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas acuáticos,⁹⁰ así como de la capacidad inherente de las metodologías holísticas para incorporar técnicas hidráulicas avanzadas y herramientas para la modelación del hábitat y otro tipo de modelos predictivos; amén de la inclusión de múltiples componentes del ecosistema que proporcionan mayor información.^{13, 14, 32, 38, 41, 56, 64, 71, 95}

7

REFERENCIAS

- 1 ALONSO, E. L. P. y GONZÁLEZ-VILLELA, R. (2007). Introducción a los caudales ambientales. En: *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. Eds. E. L. P. Alonso, M. A. Gómez, P. Saldaña. IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-Semarnat. Jiutepec, Mor., 174 pp.
- 2 ALONSO, E. L. P., Ma. A. GÓMEZ, P. SALDAÑA (2007). *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-Semarnat. Jiutepec, Mor., 176 pp.
- 3 ÁLVAREZ, J. (1970). *Peces mexicanos (Claves)*. Sec. Ind. Com. Dirección General de Pesca e Industria. Conexas, 166 pp.
- 4 APARICIO, M. F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México.
- 5 ARTHINGTON, A. H. (1998) *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Holistic Methodologies*. Occasional Paper No. 26/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation. Canberra, Australia.
- 6 ARTHINGTON, A. H., y R. LLOYD (1998). *Logan River Trial of the Guiding Block Methodology for Assessing Environmental Flow Requirements*. Workshop Report. Centre for Catchment and In-stream Research and Development Natural Resources. Brisbane, Australia.
- 7 ARTHINGTON, A. H., S. O. BRIZGA, S. C. CHOY, M. J. KENNARD, S. J. MACKAY, R. O. MCCOSKER, J. L. RUFFINI Y J. M. ZALUCKI (2000). *Environmental Flow Requirements of the Brisbane River Downstream of Wivenhoe Dam*. South East Queensland Water Corporation, and Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University. Brisbane, Australia.
- 8 ARTHINGTON, A. H., S. BUNN, L. POFF y R. J. NAIMAN (2006). The Challenge of Providing Environmental Flow Rules to Sustain River Ecosystems. *Ecological Applications*, 16(4): 1311-1318.
- 9 BAYLEY, P. B. (1995). Understanding Large River-floodplain Ecosystem. *BioScience* 45(3):54-158.
- 10 BEGON, M., J. L. HARPER Y C. R. TOWNSEND (1987). *Ecology; Individuals, Populations and Communities*. Blackwell Sci. Publ., 876 pp.
- 11 BOJÓRQUEZ, L. A. (1989). Methodology for Prediction of Ecological Impacts Under Real Conditions in Mexico. *Environmental Management*. Vol. 13: 545-551.
- 12 BOULTON, A. J. (1999). An Overview of River Health Assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis. *Freshwater Biology* 41: 469-479.
- 13 BOVEE, K. D. (1986). *Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology*. National Ecology Center. Division of Wilde and Contaminant Research. Fish and Wilde Service. US Department of Interior. Washington, DC. 233 pp.
- 14 BROWN, C. y J. KING (2003a). Environmental Flows: Concepts and Methods. En: *Water Resource and Environment Technical Note 1*. (Eds.) Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- 15 BROWN, C. y J. KING (2003b). Environmental Flows: Case Studies. En: *Water Resources and Environment*. (Eds.) Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.

- 16 BROWN, C. y J. KING (2003c). Environmental Flows: Flood Flows. En: *Water Resources and Environment*. (Eds.) Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- 17 BUNN, S. E. y P. M. DAVIES (2000). Biological Processes in Running Waters and their Implications for the Assessment of Ecological Integrity. *Hydrobiologia* 422/423: 61-70.
- 18 BUNN, S. E. y A. H. ARTHINGTON (2002). Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. *Environmental Management* 30(4): 492-507.
- 19 CASTRO-AGUIRRE, J. L. (1978). *Catálogo sistemático de los peces marinos que penetran a las aguas continentales de México, con aspectos zoogeográficos y ecológicos*. Dirección General del Instituto Nacional de la Pesca. Serie Científica No. 19 a 29. México.
- 20 CHAPRA, S., H. TAO y G. PELLETIER (2009). *Qual2K Fortran. Stream Water Quality Model. Version 2.07*. United States Environmental Protection Agency. USA.
- 21 CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2008). *Estudios hidrológicos, hidrogeoquímicos, fluviales, hidrodinámica lagunar-costera, manejo de cuenca y distrito de riego, caudal ecológico, calidad del agua superficial y contaminación difusa de las lagunas de Chacahua del Sistema Ambiental Regional del Proyecto de Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples, Paso de la Reina Oaxaca (periodo de muestreo julio a diciembre, 2008)*. Convenio de Colaboración CFE-IMTA-SC-CPH-13. México.
- 22 CLOQUELL-BALLESTER, V. A., R. MONTERDE-DÍAZ, V. A. CLOQUELL-BALLESTER, M. C. SANTAMARINA-SIURANA (2007). Systematic Comparative and Sensitivity Analyses of Additive and Outranking Techniques for Supporting Impact Significance Assessments. *Environmental Impact Assessment Review* 27: 62-83.
- 23 CNA (Comisión Nacional del Agua) (1994). *Archivos de información actualizada a 1994, de estaciones hidrométricas*. Comunicación Personal.
- 24 CNA (Comisión Nacional del Agua) (1994). *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. México. 174 pp.
- 25 CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2014). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua.
- 26 COLE, G. A. (1994). *Textbook of Limnology*. 4th ed. Waveland Press. Prospect Heights. Illinois. USA.
- 27 CONABIO, 31. *Río Verde-Laguna de Chacahua*. (20 de enero de 2009). Disponible en World Wide Web: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_031.html.
- 28 DABOS, R. y R. HIRJI (2003). *Water Resources and Environment Technical Note C.1. Environmental Flows: Concept and Methods*. Series Editions. The World Bank, Washington, DC.
- 29 DALTON, P. M. (1989) *Oaxaca Tierra del Sol. Monografía Estatal* (Secretaría de Educación Pública. Oaxaca de Juárez. (30 de enero de 2009). Disponible en World Wide Web: Wikipedia. Enciclopedia Libre. http://es.wikipedia.org/wiki/Oaxaca_de_Ju%C3%A1rez
- 30 DE SMEDT, P. (2010). The Use of Impact Assessment Tools to Support Sustainable Policy Objectives in Europe. *Ecology and Society* 15(4): 30.
- 31 DÍAZ-PARDO, E., J. PAULO-MAYA y E. SOTO-GALERA (1996). *Monitoreo de la ictiofauna posterior a la construcción de la PH. Zimapán*. Informe final.
- 32 DYSON, M., G. BERGKAMP y J. SCANLON, J. (2003). *Flow*. Editorial UICN. UK, 125 pp.
- 33 EATON A. D., L. S. CLESCERI, E. W. RICE, A. E. GREENBERG, M. A. FRANSON (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste water*. 21st edition. APHA, (American Public Health Association). USA.
- 34 ESTADO DE OAXACA. *México Tenoch. Oaxaca*. (15 enero de 2009). Disponible en World Wide Web: <http://www.mexico-tenoch.com/enmarca.php?de=http://www.mexico-tenoch.com/gobernadores/oaxaca/oax.html>.
- 35 EVANS, B. M., D. W. LEHNING y K. J. CORRADINI (2008). *AVGWLF Version*

- 7.1. ArcView Generalized Watershed Loading Function. Users Guide. Penn State Institutes of Energy and the Environment. The Pennsylvania State University. USA.
- 36 FDEPBMR y SFWMD (Florida Department of Environmental Protection Bureau of Mine Reclamation and the Southwest Florida Water Management District) (2007). *Final Report for the Peace River Cumulative Impact Study*. PBS&J. Tampa, Florida.
- 37 FISCHER, S. y H. KUMMER (2000). Effects of Residual Flow and Habitat Fragmentation on Distribution and Movement of Bullhead (*Cottus gobio* L.) in an Alpine Stream. *Hydrobiologia* 422/423: 305-317.
- 38 FISRWG (Federal Interagency Stream Restoration Working Group) (1998). *Stream Corridor Restoration Principles, Processes, and Practices*. USA Government.
- 39 GAFNY, S., M. GOREN y A. GASITH (2000). Habitat Condition and Fish Assemblage Structure in a Coastal Mediterranean Stream (Yarqon, Israel) receiving Domestic Effluent. *Hydrobiologia* 422/423: 319-330.
- 40 GALAT, D. L. y R. LIPKIN (2000). Restoring Ecological Integrity of Great Rivers: Historical Hydrographs Aid in Defining Reference Conditions for the Missouri River. *Hydrobiologia* 422/423: 29-48.
- 41 GARCÍA DE JALÓN, D. (1995). Management of Physical Habitat for Fish Stocks. In: *The Ecological Basis for River Management*. (Eds.) D. M. Harper y J. D. Ferguson. John Wiley & Sons, Chichester, 363-374 pp.
- 42 GARCÍA, R. E., R. GONZÁLEZ-VILLELA, P. MARTÍNEZ A., J. ÁTALA M. y G. A. P. SOLDÁN (1999). *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México*. Colección "Manuales". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor., 190 pp.
- 43 GAVIÑO, N. M. (2007). *Propuesta para la realización de un Curso-Entrenamiento para la determinación de caudales ecológicos y ambientales con particular mención al Método DRIFT*. Marcelo Gabiño Novillo y Asociados. Argentina.
- 44 GEHRKE, P. C., K. L. ASTLES y J. H. HARRIS (1999). Within-catchment Effects of Flow Alteration on Fish Assemblages in the Hawkesbury-Nepean River System. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15: 181-198.
- 45 GONZÁLEZ-VILLELA, R. (2007). Cálculo de caudales para la conservación del hábitat en ríos regulados por presas. En: *Bases teóricas y prácticas del manejo limnológico de las presas mexicanas: Hacia un manejo sustentable del agua*. (Ed.) Arredondo, F. J. L. Editorial. AGT.
- 46 GONZÁLEZ-VILLELA, R. y A. BANDERAS TARABAY (2007). Curvas de preferencia de hábitat para el cálculo de caudales en ríos regulados por presas. Caso de estudio: Río Santiago, Nayarit, México. En: *Las aguas interiores de México*. (Eds.) De la Lanza E. G. y J. L. Calderón. Editorial AGT.
- 47 GONZÁLEZ-VILLELA, R. y A. BANDERAS TARABAY (2007). Estudio comparativo de tres metodologías para el manejo y cálculo de caudales ambientales en el río Santiago, Nayarit, México. Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. Libro electrónico. UAQ-INE.
- 48 GONZÁLEZ-VILLELA, R. (2010). *Determinación del caudal ambiental para el manejo integrado de las cuencas*. Río Verde, Oax., México. XXI Congreso Nacional de Hidráulica. 27 al 30 de octubre. XXIX Consejo Directivo Nacional de la Asociación Mexicana de Hidráulica, A. C. 14 pp.
- 49 GUSTARD, A. (1992). *Analysis of River Regimes*. (Eds.) Calow and Petts. *The Rivers Handbook*, Vol. I. John Wiley & Sons.
- 50 HARDY, T. B., S. WILLIAMSON, T. J. WADDLE (1997). *The Theory and Application of the Physical Habitat Simulation System (PHABSIM)*. Midcontinental Ecological Science Center. United States Geological Survey. Biological Resources Division. Fort Collins, CO. USA.
- 51 INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1981). *Digetenal*.
- 52 INNIS, S. A., R. J. NAIMAN y S. R. ELLIOTT (2000). Indicators and Assessment Methods for Measuring the

- Ecological Integrity of Semi-aquatic Terrestrial Environments. *Hydrobiologia* 422/423: 111-131.
- 53 JHONSON, C. (1997). Equilibrium Response of Riparian Vegetation to Flow Regulation in the Platte River, Nebraska. *Regulated Rivers; Research & Management*. Vol. 13: 403-145.
- 54 JUNGWIRTH, M., S. MUHAR y S. SCHMUTZ (2000). Fundamentals of Fish Ecological Integrity and their Relation to the Extended Serial Discontinuity Concept. *Hydrobiologia* 422/423: 85-97.
- 55 KARR, J. R., L. A. TOTH, y D. R. DUDLEY (1985). Fish Communities of Midwestern Rivers: a History of Degradation. *BioScience* 35: 90-95.
- 56 KING, J. M., R. E. THARME, M. S. DE VILLIERS (Eds.) (2000). *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission: Pretoria, South Africa.
- 57 KING, J., C. BROWN, y H. SABET (2003). A Scenario-based Holistic Approach to Environmental Flow Assessments for Rivers. *River Research and Applications* 19: 619-639.
- 58 KING, J. y C. BROWN (2006). Environmental Flows: Stiking the Balance between Development and Resource Protection. *Ecology and Society* 11(2): 26-47.
- 59 KOMAR, P. D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliff, N. J. Prentice Hall, 429 pp.
- 60 LOWE-MacCONNELL, R. H. (1975). *Fish Communities in Tropical Freshwater*. Academic Press. New York XVII. London, Logman, 337 pp.
- 61 LYTLE, D. H. y N. L. POFF (2004). Adaptation to Natural Flow Regime. *Trends in Ecology and Evolution* 19: 94-100.
- 62 MACLEOD, W. D., C. K. MINNS, A. MATHERS y S. MEE (1995). *An Evaluation of Biotic Indices and Habitat Suitability Scores for Classifying Littoral Habitats*. Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2334. Minister of Supply and Services Canada, 26 pp.
- 63 MADDOCK, I. (1999). The Importance of Physical Habitat Assessment to Evaluating River Health. *Freshwater Biology* 46: 807-819.
- 64 MILHOUSE, R. T., M. A. UPDIKE, D. M. SCHNEIDER (1989). *Physical Habitat Simulation System Reference Manual, Versión II*. U. S. Department of the Interior Fish and Wildlife Service Research and Development, Washington, DC, 636 pp.
- 65 MOOG, O. y A. CHOVANEC (2000). Assessing the Ecological Integrity of Rivers: Walking the Line among Ecological, Political and Administrative Interest. *Hydrobiologia* 422/423: 99-109.
- 66 MUHAR, S., M. SCHWARZ, S. SCHMUTZ y M. JUNGWIRTH (2000). Identification of Rivers with High and Good Habitat Quality: Methodological Approach and Applications in Austria. *Hydrobiologia* 422/423: 343-358.
- 67 NAIMAN, R. J., S. R. ELLIOTT, J. M. HELFIELD y T. C. O'KEEFE (2000). Biophysical Interactions and the Structure and Dynamics of Riverine Ecosystems: the Importance of Biotic Feedbacks. *Hydrobiologia* 410: 79-86.
- 68 NESTLER, J. M. (1993). *Instream Flow Incremental Methodology: A Synopsis with Recommendations for use and Suggestions for Future Research*. Technical Report EL-93.3. US Army Corp of Engineers. USA, 45 pp.
- 69 POFF, N. L. (1966). A Hydrogeography of Unregulated Streams in the United States and an Examination of Scale-dependence in some Hydrological Descriptors. *Freshwater Biology*. 36: 71-91.
- 70 POFF, N. L., J. D. ALLAN, M. B. BAIN, J. R. KARR, K. L. PRESTEGAARD, B. D. RICHTER, R. E. SPARKS y J. C. STROMBERG (1997). The Natural Flow Regime. *BioScience* 47: 769-784.
- 71 POFF, N. L., RICHTER, B. D., ARTHINGTON, A. H., BUNN, S., NAIMAN, R. J., KENDY, E., ACREMAN, M., APSE, C., BLEDSOE, B. P., FREEMAN, M. C., HENRIKSEN, J., JACOBSON, R. B., KENNEN, J. G., MERRITT, D. M., O'KEEFEE, J. H., OLDEN, J. D., ROGERS, K., THARME, R. E. Y WARNER, A. (2009). The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA): a New Framework for Developing Regional Environmental Flow Standards. *Freshwater Biology*.

- 72 RABENI, C. F. y R. B. JACOBSON (1993). The Importance of Fluvial Hydraulics for Fish-habitat Restoration in Low-gradient Alluvial Streams. *Freshwater Biology* 29: 211-220.
- 73 RAVEN, P. J., N. T. H. HOMES, M. NAURA y F. H. DAWSON (2000). Using River Habitat Survey for Environmental Assessment and Catchment Planning in the U.K. *Hydrobiologia* 422/423: 359-367.
- 74 REYNOLDS, C. S. (1993). The Ecosystem Approach to Water Management. The Main Features of the Ecosystems Concept. *Journal Aquatic Ecosystem Health*, 2: 3-8.
- 75 RICHTER, B. D., J. V. BAUMGARTHNER, J. POWELL y D. P. BRAUN (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4): 1163-1174.
- 76 RICHTER, B. D., J. V. BAUMGARTHNER y BRAUN D. P. (1997). How Much Water does a River need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- 77 RICHTER, B. D., A.T. WARNER, J. L. MEÑYER y K. LUTZ (2006). A Collaborative and Adaptive Process for Developing Environmental Flow Recommendations. *River Research and Applications*, 22: 297-318.
- 78 RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ, M. (1992). *Técnicas de evaluación cuantitativa de la madurez gonádica en peces*. AGT Editor, S. A. México, 79 pp.
- 79 ROSENBERG, D. M., P. McCULLY, y C. M. PRINGLE (2000). Global-scale Environmental Effects of Hydrological Alterations: Introduction. *BioScience* 50 (9): 746-751.
- 80 RUBÍN, R. (1976). *La piscifactoría*. Editorial Cecsá. México, pp. 89-94.
- 81 RUIZ, L. A. et al. (2009). *Estudios hidrológicos, hidrogeoquímicos, fluviales, hidrodinámica lagunar-costera, manejo de cuenca y distrito de riego, caudal ecológico, calidad del agua superficial y contaminación difusa de las lagunas de Chacahua del Sistema Ambiental Regional del Proyecto de Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples, Paso de la Reina Oaxaca (periodo de muestreo abril a diciembre, 2009)*. Proyecto TC-0957.3. Convenio IMTA-CFE. Mexico.
- 82 SAFFRAN, K., K. Cash, K. Hallard, B. Neary y R. Wright (2001). *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual*. Water Quality Index Technical Subcommittee of the CCME Water Quality Guidelines Task Group. Canada.
- 83 SCHIEMER, F. (2000). Fish as Indicators for the Assessment of the Ecological Integrity of Large Rivers. *Hydrobiologia* 422/423: 271-278.
- 84 SCHRECK, C. y P. B. MOYLE (1990). *Methods for Fish Biology*. American Fisheries Society. Bethesda Maryland, 684 pp.
- 85 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA (1997). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Delitos Ambientales (LGEEPA)*. Semarnap. Profepa. México, 244 pp.
- 86 SEMARNAT (2007). *Acuerdo de Disponibilidad*. Diario Oficial de la Federación. Primera Sección. México, pp. 33-80.
- 87 SPENCE, B. C., G. A. LOMNSCKY, R. M. HUGHES y R. P. NOVITSKI (1996). *An Ecosystem Approach to Salmonid Conservation*. Mantech Environmental Research Service Corp. Corvallis, Oregon. USA.
- 88 STALNAKER, C. B. (1995). What is the IFIM? En: *A Compressive Overview of the Instream Flow Incremental Methodology*. (Ed.). Bovee, K. D. National Biological Service. Fort Collins, CO. USA, pp. 1-23.
- 89 STATISTICA FOR WINDOWS (1995). *Statistica II. Volumen III*. 2nd. Edition, Statsoft. USA. 3782 pp.
- 90 STICHLER, W. (1980). *Application of 2H and 18° in Hydrological Studies*. GSF-Bericht. R 229.
- 91 TENNANT, D. L. (1976). *Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources*. US Fish and Wild Life Service, Montana. USA.
- 92 THARMER, 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: 397-441.

- 93 THOMAS, J. A. y K. D. BOVEE (1993). Application and Testing of a Procedure to Evaluate Transferability of Habitat Suitability Criteria. *Regulated Rivers: Research & Management* 8: 285-294.
- 94 THOMPSON, D. y W. A. ROSS (2001). *Environmental Impact Assessment. Encyclopedia of Life Sciences*. Macmillan Publishing Group. USA.
- 95 TNC (THE NATURE CONSERVANCY) (2006). Ecological Limits of Hydrologic Alteration. Integrating Environmental Flows with Regional Water Management. *Sustainable Waters Program. Bulletin*, pp. 1-4.
- 96 TOWNSEND, C. R. y R. RILEY (1999). Assessment of the River Health: Accounting for Perturbation Pathways in Physical and Ecological Space. *Freshwater Biology* 41: 393-405.
- 97 US GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *PHABSIM for Windows. User's Manual and Exercises Midcontinent*. (2001). Ecological Science Center. Open File Report 01-340. US Department of Interior. US Geological Survey. USA.
- 98 VERDONSCHOT P. F. M. (2000). Integrated Ecological Assessment Methods as a Basis for Sustainable Catchment Management. *Hydrobiologia* 422/423: 389-412.
- 99 WALKER, K. F., F. SHELDON, y J. T. PUCKRIDGE (1995). An Ecological Perspective on Dry Land Rivers. *Regulated Rivers: Research and Management* 11: 85-104.
- 100 WALLER-BARRERA, C., MENDOZA-ESPINOSA, L. G., MEDELLIN-AZUARA, J., LUND, J. R. (2009). Optimización económico-ingenieril del suministro agrícola y urbano: Una aplicación de reúso del agua en Ensenada, Baja California. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 4, pp. 87-103.
- 101 WARD, J. V. y K. TOCKNER (2001). Biodiversity: Towards a Unifying Theme for River Ecology. *Freshwater Biology* 46: 807-819.
- 102 WHITE, R. I. y O. M. BRYNILDSON (1967). *Guidelines for Management of Trout Stream Habitat in Winsconsin*. Technical Bulletin No. 39. Department of Natural Resources. Madison, Winsconsin, 63 pp.
- 103 WOOTTON, R. (1990). *Ecology of Teleost Fishes*. Chapman and Hall. London, 402 pp.
- 104 ZAR, J. H. (1999). *Biostatistical Analysis*. 4th Edition. Prentice Hall. USA.

ANEXO 1

CÁLCULO DE CAUDALES POR EL MÉTODO DE LOS NÚMEROS DE ESCURRIMIENTO, EN LA CUENCA DEL RÍO TEPIC, NAYARIT

Tabla 4.3.4b. Cálculo del escurrimiento para el mes de febrero (época de secas), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zona	Vegetación	Área (m ²)	Tipo de suelo	Tipo de suelo (cuadro 11)	Pendiente terreno	Número escurrimiento	N corregido	P = altura total lluvia mensual (cm)	Pe = altura lluvia efectiva (cm)	C = coeficiente escurrimiento	Escurrimiento o (m ³ /s)
		Ac				N		(cm)	(cm)		(m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	1.02	0.157001244	0.153922788	0.003178055
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.13	0.681174138	0.602808972	0.3070014
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.03	0.721473303	0.700459518	0.011613
3a	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.92	0.767387715	0.834117081	0.012539202
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.92	0.767387715	0.834117081	0.02152251
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.92	0.767387715	0.834117081	0.030880123
6	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	0.92	0.184681239	0.200740477	0.016304654
6a	At	29 205 000	(Th+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	1.08	0.305546025	0.282912986	0.036886044
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	1.132	0.289009132	0.255308421	0.164157713
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	B = arenas finas y limos	>1	84	69	1.35	0.082946424	0.061441796	0.051847344
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	C = alto cont. arcilla		77	55	1.03	0.553605095	0.537480675	0.117057546
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		70	51	1.46	0.557674726	0.381968899	0.013056667
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.46	0.557674726	0.381968899	0.008704447
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.46	0.557674726	0.381968899	0.015640803
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.46	0.557674726	0.381968899	0.036857892
12	BQ	12 567 000	(1/2Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.99	0.73797598	0.745430283	0.038335583
12a	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	C = alto cont. arcilla		60	40	1.46	1.188027552	0.813717501	0.061714378
12b	BQ										
13	At	4 012 000	(Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.99	0.335420472	0.338808558	0.005562611
				B = arenas finas y limos							
		Ac = 590 000 000									
						PROM. =	1.151777778			Q = Escurrimiento de la cuenca =	0.952859973

Vegetación:

At = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4c. Cálculo del escurrimiento para el mes de marzo (época de secas), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	II Vegetación (m ²)	III Área Ac	IV Tipo de suelo (cuadro 11)	V Tipo de suelo	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	1.02	0.157001244	0.1539222788	0.003178055
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.51	0	0	0
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.66	0	0	0
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.63	0	0	0
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.63	0	0	0
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.63	0	0	0
6	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	0.63	0.279750027	0.444047663	0.022307725
6a	At	29 205 000	(Th+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.51	0	0	0
6b	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.49	0	0	0
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		84	69	0.36	0	0	0
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	55	0.53	0	0	0
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.29	0	0	0
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.29	0	0	0
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.29	0	0	0
11	BQ	15 989,000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.29	0	0	0
12	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.55	0	0	0
12a	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos		60	40	0.29	0	0	0
12b	BQ										
13	At	4 012 000	(Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.55	0.505358545	0.918833719	0.007569812
Ac =		590 000 000					PROM =	0.4583333	Q = Escurrimiento	de la cuenca =	0.029877537

Vegetación

At = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo: :

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4d. Cálculo del escurrimiento para el mes de abril (época de secas), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	0.13	0	0	0
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	0.49	0	0	0
3a	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	0.43	0	0	0
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	0.25	0	0	0
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	0.25	0	0	0
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	0.25	0	0	0
6										
6a	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla		84	0.25	0	0	0
6b	At	29 205 000	(Th + +)	B = arenas finas y limos		79	0.19	0	0	0
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos		79	0.16	0	0	0
6d	At	151 217 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		84	0.12	0	0	0
7	BP	51 153 000	(Th + +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	0.21	0	0	0
8	Sbc	5 664 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	0.03	0	0	0
9	Sbc	3 776 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	0.03	0	0	0
10	BQ	6 785 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	0.03	0	0	0
11	BQ	15 989 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	0.03	0	0	0
12										
12a	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	0.42	0	0	0
12b	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos		60	0.03	0	0	0
13	At	4 012 000	(Bc++)	B = arenas finas y limos	>1	79	0.42	0	0	0
Ac =		590 000 000					0.1994	Q =Escurrimiento de la cuenca =		0

Vegetación:

At = Agricultura de temporal

Smsc = Selva mediana subcaducifolia

BQ = Bosque de encino

BP = Bosque de pino

Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso

(Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso

(Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso

(Bh) = Cambisol húmico

(Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4e. Cálculo del escurrimiento para el mes de mayo (época de secas), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	I Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	0.84	0.208669493	0.248416063	0.00381516
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.93	0.763144377	0.820585352	0.310659938
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.93	0.763144377	0.820585352	0.011094998
3a	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.9	0.775916234	0.862129149	0.011451601
3b	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.9	0.775916234	0.862129149	0.019655733
4	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.9	0.775916234	0.862129149	0.028201705
5	BQ										
6	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	0.9	0.190522775	0.211691973	0.015192598
6a	At	29 205 000	(Th + +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.92	0.359771564	0.391056048	0.039229124
6b	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.98	0.338839001	0.345754083	0.173835894
6c	At	151 217 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	1.01	0.15965591	0.158075158	0.09013847
6d	At										
7	BP	51 153 000	(Th + +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	55	0.89	0.609126722	0.684412047	0.116333106
8	Sbc	5 664 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.09	0.697130453	0.639569223	0.014742185
9	Sbc	3 776 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.09	0.697130453	0.639569223	0.009828123
10	BQ	6 785 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.09	0.697130453	0.639569223	0.017659909
11	BQ	15 989 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.09	0.697130453	0.639569223	0.04161596
12											
12a	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	0.77	0	0	0
12b	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos		60	40	1.09	0	0	0
13	At	4 012 000	(Bc + +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	0.77	0.415315991	0.539371416	0.006221056
		Ac =	590 000 000			PROM=	0.949	Q=Escurrimiento	de la cuenca =		0.909675569

Vegetación:

At = Agricultura de temporal
Smsc = Selva mediana subcaducifolia
BQ = Bosque de encino
BP = Bosque de pino
Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
(Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
(Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
(Bh) = Cambisol húmico
(Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4f. Cálculo del escurrimiento para el mes de junio (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	93	8.03	6.11815914	0.76191272	0.115588832
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	13.44	9.241232075	0.687591672	3.887307159
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	16.01	11.65646778	0.72807419	0.175116842
3a	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	16.42	12.04545549	0.733584378	0.183702491
3b	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	16.42	12.04545549	0.733584378	0.315310245
4	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	16.42	12.04545549	0.733584378	0.452401656
5	BQ	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla		84	93	16.42	14.32943852	0.872682005	1.180741311
6	At	29 205 000	(Th + +)	B = arenas finas y limos		79	90	16.13	13.17649814	0.816893871	1.484643628
6a	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos		79	90	16.61	13.64547835	0.821521875	7.233946084
6b	At	151 217 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		84	93	17.58	15.47707746	0.880379833	9.029310271
6c	At	51 153 000	(Th + +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	89	15.94	12.70693292	0.797172705	2.507707329
7	BP	5 664 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	85	16.9	12.50192446	0.739758844	0.273190201
8	Sbc	3 776 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	85	16.9	12.50192446	0.739758844	0.182126801
9	BQ	6 785 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	85	16.9	12.50192446	0.739758844	0.327259095
10	BQ	15 989 000	(Ah + +)	C = alto cont. arcilla		70	85	16.9	12.50192446	0.739758844	0.771193172
11	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	85	19.59	15.07809008	0.769683006	0.731043048
12	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos		60	78	16.9	10.57092748	0.625498667	0.512518694
12a	BQ	4 012 000	(Bc + +)	B = arenas finas y limos	>1	79	90	19.59	16.56789848	0.845732439	0.256444478
12b	At										
13	At										
Ac =		590 000 000				PROM =	16.283	Q = Escurrimiento	de la cuenca =		29.61955134

Tipos de suelo:

Vegetación:

- At = Agricultura de temporal
- Smsc = Selva mediana subcaducifolia
- BQ = Bosque de encino
- BP = Bosque de pino
- Sbc = Selva baja caducifolia

- (Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
- (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
- (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
- (Bh) = Cambisol húmico
- (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4g Cálculo del escurrimiento para el mes de julio (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	93	35.02	32.82581028	0.937344668	0.600164251
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	34.88	30.02349616	0.860765372	12.22193038
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	36.05	31.17807796	0.864856532	0.453283436
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	37.11	32.22487477	0.868360948	0.475600844
4	BQ	6 785 000		C = alto cont. arcilla	>1	70	85	37.11	32.22487477	0.868360948	0.816329806
5	BQ	9 735 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	37.11	32.22487477	0.868360948	1.171255809
6	At	21 358 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla		84	93	37.11	34.91040109	0.940727596	2.783812525
6a	At	29 205 000	(Lc + o).	B = arenas finas y limos		79	90	35.02	31.84699785	0.90939457	3.472564113
6c	At	137 411 000	(Th+ +)	B = arenas finas y limos		79	90	34.99	31.81716994	0.909321804	16.32328681
6d	At	151 217 000	(Bh)	C = alto cont. arcilla		84	93	32.97	30.78175263	0.933629136	17.37874958
7	BP	51 153 000	(Ah+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	89	35.38	31.87290365	0.900873478	6.087196239
8	Sbc	5 664 000	(Th+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	31.82	27.0086833	0.848794416	0.571150416
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	31.82	27.0086833	0.848794416	0.380766944
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	31.82	27.0086833	0.848794416	0.684190603
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. Arcilla		70	85	31.82	27.0086833	0.848794416	1.612310029
12	BQ	12 567 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	36.41	31.53351538	0.866067437	1.479546325
12a	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	B = arenas finas y limos		60	78	31.82	24.58985757	0.772779936	1.15375127
12b	BQ	4 012 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos	>1	79	90	36.41	33.2293172	0.912642604	0.497744999
13	At		(Bc+ +)								
		Ac =	590 000 000			PROM =	34.7038	Q = de la cuenca = Escurrimiento			68.16363438

Vegetación:

At = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4h. Cálculo del escurrimiento para el mes de agosto (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimient o (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	93	36.61	34.41164121	0.939951959	0.62915847
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	37.71	32.81770168	0.870265226	9
3											13.3593923
3a	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	33.2	28.36735035	0.854438263	6
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	28.84	24.08078915	0.834978819	
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	28.84	24.08078915	0.834978819	
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	28.84	24.08078915	0.834978819	7
6											0.35540382
6a	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla		84	93	28.84	26.66616045	0.924624149	1
6b	At	29 205 000	(Th + +)	B = arenas finas y limos		79	90	28.97	25.83839273	0.891901717	0.61002148
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos		79	90	29.62	26.48319198	0.894098311	4
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		84	93	30.62	28.43949688	0.928788272	0.87524821
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	89	28.61	25.15948329	0.879394732	7
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	30.79	25.99564112	0.844288442	2.12640328
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	30.79	25.99564112	0.844288442	1
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	30.79	25.99564112	0.844288442	2.81739195
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	30.79	25.99564112	0.844288442	13.5867752
12											9
12a	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	85	30.12	25.33725901	0.841210458	16.0563597
12b	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limo		60	78	30.79	23.59840452	0.766430806	7
13	At	4 012 000	(Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	90	30.12	26.97933349	0.895728203	4.80504423
											8
											0.54972861
											1
											0.36648574
											1
											0.65852906
											6
											1.55183805
											9

Tabla 4.3.4h. Cálculo del escurrimiento para el mes de agosto (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zona	Vegetación	Área (m ²)	Tipo de suelo	Tipo de suelo (cuadro 11)	Pendiente terreno	Número escurrimiento	N corregido	P = altura total lluvia mensual (cm)	Pe = altura lluvia efectiva (cm)	C = coeficiente escurrimiento	Escurrimiento (m ³ /s)
		Ac				N	N	(cm)	(cm)		
											1.18881919 8
											1.10723248 8
											0.40412591 8
<hr/>											
		Ac =	590 000 000		PROM =		30.82722	Q = Escurrimiento		de la cuenca =	
											61.46037755

Vegetación:

At = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3-4i. Cálculo del escurrimiento para el mes de *septiembre* (época de lluvias), por medio del método de *Los Números de Escurrimiento*. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ² Ac)	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	93	31.75	29.56563654	0.931201151	0.558576088
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	34.64	29.78677553	0.859895368	12.52975197
3											
3a	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	28.86	24.10040722	0.835079945	0.362063988
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	22.72	18.10494055	0.796872383	0.276114313
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	22.72	18.10494055	0.796872383	0.473927552
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	85	22.72	18.10494055	0.796872383	0.67998301
6											
6a	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla		84	93	22.72	20.57653499	0.90565735	1.695500133
6b	At	29 205 000	(Th+ +)	B = arenas finas y limos		79	90	23.71	20.63005724	0.87009942	2.324463047
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos		79	90	23.92	20.83759668	0.871136985	11.04673996
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		84	93	24.92	0.913483057	0.913483057	13.28049171
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	89	23.45	20.06242425	0.85554048	3.9599310138
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	25.72	21.02675514	0.817525472	0.459473538
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	25.72	21.02675514	0.817525472	0.306315692
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	25.72	21.02675514	0.817525472	0.550411009
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	85	25.72	21.02675514	0.817525472	1.297055509
12											
12a	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	85	22.5	17.89138189	0.795172528	0.867442115
12b	BQ	12 567 000	(1/2Bc+ +)	B = arenas finas y limos		60	78	25.72	18.75494571	0.729196956	0.909310967
13	At	4 012 000	(Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	90	22.5	19.43504792	0.863779908	0.30082335
		Ac =					PROM =	25.31833	Q = Escurrimiento	de la cuenca =	51.87775409

Vegetación:

At = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4j. Cálculo del escurrimiento para el mes de octubre (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	II Vegetación.	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	7.67	1.727878593	0.225277522	0.031591329
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	8.56	0.482019795	0.056310724	0.196220065
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	7.86	0.324131089	0.041238052	0.00471239
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	6.9	0.154305371	0.022363097	0.002277364
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	6.9	0.154305371	0.022363097	0.003908908
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	6.9	0.154305371	0.022363097	0.005608433
6	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	6.9	1.33025223	0.192790178	0.10607649
6b	At	29 205 000	(Th + +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	7.4	0.925430055	0.125058116	0.100907948
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	8.46	1.366753386	0.161554774	0.701190821
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	9.87	3.030268485	0.307018084	1.710827769
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana	>1	77	55	6.78	0.294096735	0.0433771	0.056167601
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	10.81	1.158983272	0.107213994	0.024508965
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	10.81	1.158983272	0.107213994	0.016333931
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	10.81	1.158983272	0.107213994	0.029359698
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	10.81	1.158983272	0.107213994	0.069186766
12	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	7.03	0.173957903	0.024745079	0.008162071
12a	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos	>1	60	40	10.81	0.246454347	0.022798737	0.011563589
12b	BQ	12 567 000	(1/2Bc + +)	B = arenas finas y limos	>1	60	40	10.81	0.246454347	0.022798737	0.011563589
13	At	4 012 000	(Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	7.03	0.787232646	0.111981884	0.01179203
		Ac =	590 000 000			PROM =	8.4616	Q = Escurrimiento de la cuenca =		3.090401548	

Vegetación

t = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo:

A(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4k. Cálculo del escurrimiento para el mes de noviembre (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escurrimiento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	1.55	0.05021791	0.032398651	0.000948754
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. Arcilla	>1	70	51	1.99	0.388443296	0.195197636	0.163397953
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	1.79	0.448218747	0.250401535	0.006733657
3b	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	1.45	0.561207456	0.387039625	0.008558847
4	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	1.45	0.561207456	0.387039625	0.014690558
5	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. Arcilla	>1	70	51	1.45	0.561207456	0.387039625	0.021077757
6	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla		84	69	1.45	0.06548224	0.045160166	0.005395716
6a	At	29 205 000	(Th + +)	B = arenas finas y limos		79	62	1.83	0.11533703	0.0630257	0.01299544
6c	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos		79	62	2.02	0.082619323	0.040900655	0.043799397
6d	At	151 217 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		84	69	2.59	0.008077948	0.003118899	0.004712666
7	BP	51 153 000	(Th+ +)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	55	1.66	0.340808121	0.205306097	0.067258325
8	Sbc	5 664 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.87	0.180557709	0.062912094	0.00394552
9	Sbc	3 776 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.87	0.180557709	0.062912094	0.002630347
10	BQ	6 785 000	(Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.87	0.180557709	0.062912094	0.004726405
11	BQ	15 989 000	(Ah+ +)	C = alto cont. Arcilla		70	51	2.87	0.180557709	0.062912094	0.011137875
12	BQ	12 567 000	(1/2Ah+ +)	C = alto cont. arcilla		70	51	1.75	0.460759986	0.26329142	0.022339393
12a	BQ	12 567 000	(1/2Bc+ +)	B = arenas finas y limos		60	40	2.87	0.676536732	0.235727084	0.032801069
12b	BQ										
13	At	4 012 000	(Bc+ +)	B = arenas finas y limos	>1	79	62	1.75	0.130895443	0.074797396	0.002026051
Ac =		590 000 000				PROM =		2.06	Q = Escurrimiento	de la cuenca =	0.429175731

Vegetación :

At = Agricultura de temporal
 Smsc = Selva mediana subcaducifolia
 BQ = Bosque de encino
 BP = Bosque de pino
 Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo :

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
 (Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
 (Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
 (Bh) = Cambisol húmico
 (Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

Tabla 4.3.4I. Cálculo del escurrimiento para el mes de diciembre (época de lluvias), por medio del método de Los Números de Escorrimento. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

I Zona	II Vegetación	III Área (m ²) Ac	IV Tipo de suelo	V Tipo de suelo (cuadro 11)	VI Pendiente terreno	VII Número escurrimiento N	VIII N corregido	IX P = altura total lluvia mensual (cm)	X Pe = altura lluvia efectiva (cm)	XI C = coeficiente escurrimiento	XII Escurrimiento (m ³ /s)
1	At	4 897 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	84	69	2.03	0.005705101	0.002810395	0.000104308
2	Smsc	109 032 000	(Ah + o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	2.56	0.243898309	0.095272777	0.099285844
3	BQ	3 894 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	2.73	0.207875101	0.076144726	0.003022198
3a	BQ	3 953 000	(1/2Ah+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	2.68	0.218142668	0.081396518	0.003219526
3b	BQ	6 785 000	(1/2Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	2.68	0.218142668	0.081396518	0.005526053
4	BQ	9 735 000	(Lc+o)	C = alto cont. arcilla	>1	70	51	2.68	0.218142668	0.081396518	0.007928685
5	BQ										
6	At	21 358 000	(Lc + o)	C = alto cont. arcilla		84	69	2.68	0.013392041	0.00499703	0.001067903
6a	At	29 205 000	(Th++)	B = arenas finas y limos		79	62	2.75	0.008692827	0.003161028	0.000947857
6b	At	137 411 000	(Bh)	B = arenas finas y limos		79	62	2.8	0.006444955	0.00230177	0.00330648
6c	At	151 217 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		84	69	2.77	0.019987176	0.007215587	0.011284352
6d	At	51 153 000	(Th++)	D = poco prof. con subh. de roca sana		77	55	2.71	0.108193359	0.039923749	0.020663138
7	BP										
8	Sbc	5 664 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.98	0.160554547	0.053877365	0.00339524
9	Sbc	3 776 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.98	0.160554547	0.053877365	0.002263493
10	BQ	6 785 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.98	0.160554547	0.053877365	0.004067214
11	BQ	15 989 000	(Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.98	0.160554547	0.053877365	0.009584478
12	BQ	12 567 000	(1/2Ah++)	C = alto cont. arcilla		70	51	2.12	0.352163826	0.166115012	0.016523457
12a	BQ	12 567 000	(1/2Bc++)	B = arenas finas y limos		60	40	2.98	0.643442917	0.215920442	0.030190215
12b	BQ										
13	At	4 012 000	(Bc++)	B = arenas finas y limos		79	62	2.12	0.06773194	0.031949028	0.001014563
		Ac =	590 000 000			PROM =	2.6783	Q=Escurrimiento de la cuenca=		0.223395005	

Vegetación :

At = Agricultura de temporal
Smsc = Selva mediana subcaducifolia
BQ = Bosque de encino
BP = Bosque de pino
Sbc = Selva baja caducifolia

Tipos de suelo :

(Ah + o) = Acrisol húmico + pedregoso
(Lc + o) = Luvisol crómico + pedregoso
(Th + +) = Andosol húmico + lecho rocoso
(Bh) = Cambisol húmico
(Bc + +) = Cambisol crómico + lecho rocoso

ANEXO 2

CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN
PROMEDIO MENSUAL PARA CADA ZONA,
DE ACUERDO CON LA INFLUENCIA DE
LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA
CUENCA DEL RÍO TEPIC

Tabla 4.3.5b. Cálculo de la precipitación para febrero en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitación por área cubierta (cm)	Precipitación total (cm)
1	A. Nervo	100	1.02	1.02	1.02
2	A. Nervo	30	1.02	0.31	
	Jumatán	60	1.21	0.73	
	Tepic	10	0.92	0.09	1.13
3a	Jumatán	40	1.21	0.48	
	Tepic	60	0.92	0.55	1.03
3b	Tepic	100	0.92	0.92	0.92
4	Tepic	100	0.92	0.92	0.92
5	Tepic	100	0.92	0.92	0.92
6a	Tepic	100	0.92	0.92	0.92
6b	Tepic	70	0.92	0.64	
	Trigomil	15	1.46	0.22	
	Refilión	15	1.45	0.22	1.08
6c	Tepic	60	0.92	0.55	
	Trigomil	40	1.46	0.58	1.13
6d	Trigomil	75	1.46	1.10	
	Cerro Blanco	25	0.99	0.25	1.35
7	Tepic	80	0.92	0.74	
	Refilión	20	1.45	0.29	1.03
8	Trigomil	100	1.46	1.46	1.46
9	Trigomil	100	1.46	1.46	1.46
10	Trigomil	100	1.46	1.46	1.46
11	Trigomil	100	1.46	1.46	1.46
12a	Cerro Blanco	100	0.99	0.99	0.99
12b	Trigomil	100	1.46	1.46	1.46
13	Cerro Blanco	100	0.99	0.99	0.99
				PROM =	1.15

Tabla 4.3.5c. Cálculo de la precipitación para marzo en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual	Precipitación por área cubierta	Precipitación total
1	A. Nervo	100	0.12	0.12	0.12
2	A. Nervo	30	0.12	0.04	
	Jumatán	60	0.69	0.41	
	Tepic	10	0.63	0.06	0.51
3a	Jumatán	40	0.69	0.28	
	Tepic	60	0.63	0.38	0.66
3b	Tepic	100	0.63	0.63	0.63
4	Tepic	100	0.63	0.63	0.63
5	Tepic	100	0.63	0.63	0.63
6a	Tepic	100	0.63	0.63	0.63
6b	Tepic	70	0.63	0.44	
	Trigomil	15	0.29	0.04	
	Refilión	15	0.17	0.03	0.51
6c	Tepic	60	0.63	0.38	
	Trigomil	40	0.29	0.12	0.49
6d	Trigomil	75	0.29	0.22	
	Cerro Blanco	25	0.55	0.14	0.36
7	Tepic	80	0.63	0.50	
	Refilión	20	0.17	0.03	0.53
8	Trigomil	100	0.29	0.29	0.29
9	Trigomil	100	0.29	0.29	0.29
10	Trigomil	100	0.29	0.29	0.29
11	Trigomil	100	0.29	0.29	0.29
12a	Cerro Blanco	100	0.55	0.55	0.55
12b	Trigomil	100	0.29	0.29	0.29
13	Cerro Blanco	100	0.55	0.55	0.55
				PROM =	0.46

Tabla 4.3.5d. Cálculo de la precipitación para *abril* en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual	Precipitaci. por área cubierta	Precipitac. total
			(cm)	(cm)	(cm)
1	A. Nervo	100	0.13	0.13	0.13
2	A. Nervo	30	0.13	0.04	
	Jumatán	60	0.70	0.42	
	Tepic	10	0.25	0.03	0.49
3a	Jumatán	40	0.70	0.28	
	Tepic	60	0.25	0.15	0.43
3b	Tepic	100	0.25	0.25	0.25
4	Tepic	100	0.25	0.25	0.25
5	Tepic	100	0.25	0.25	0.25
6a	Tepic	100	0.25	0.25	0.25
6b	Tepic	70	0.25	0.18	
	Trigomil	15	0.03	0.00	
	Reflión	15	0.07	0.01	0.19
6c	Tepic	60	0.25	0.15	
	Trigomil	40	0.03	0.01	0.16
6d	Trigomil	75	0.03	0.02	
	Cerro Blanco	25	0.42	0.10	0.12
7	Tepic	80	0.25	0.20	
	Reflión	20	0.07	0.01	0.21
8	Trigomil	100	0.03	0.03	0.03
9	Trigomil	100	0.03	0.03	0.03
10	Trigomil	100	0.03	0.03	0.03
11	Trigomil	100	0.03	0.03	0.03
12a	Cerro Blanco	100	0.42	0.42	0.42
12b	Trigomil	100	0.03	0.03	0.03
13	Cerro Blanco	100	0.42	0.42	0.42
				PROM =	0.20

Tabla 4.3.5e. Cálculo de la precipitación para mayo en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual	Precipitaci. por área cubierta	Precipitac. total
			(cm)	(cm)	(cm)
1	A. Nervo	100	0.84	0.84	0.84
2	A. Nervo	30	0.84	0.25	
	Jumatán	60	0.98	0.59	
	Tepic	10	0.90	0.09	0.93
3a	Jumatán	40	0.98	0.39	
	Tepic	60	0.90	0.54	0.93
3b	Tepic	100	0.90	0.90	0.90
4	Tepic	100	0.90	0.90	0.90
5	Tepic	100	0.90	0.90	0.90
6a	Tepic	100	0.90	0.90	0.90
6b	Tepic	70	0.90	0.63	
	Trigomil	15	1.09	0.16	
	Reflión	15	0.87	0.13	0.92
6c	Tepic	60	0.90	0.54	
	Trigomil	40	1.09	0.44	0.98
6d	Trigomil	75	1.09	0.82	
	Cerro Blanco	25	0.77	0.19	1.01
7	Tepic	80	0.90	0.72	
	Reflión	20	0.87	0.17	0.89
8	Trigomil	100	1.09	1.09	1.09
9	Trigomil	100	1.09	1.09	1.09
10	Trigomil	100	1.09	1.09	1.09
11	Trigomil	100	1.09	1.09	1.09
12a	Cerro Blanco	100	0.77	0.77	0.77
12b	Trigomil	100	1.09	1.09	1.09
13	Cerro Blanco	100	0.77	0.77	0.77
				PROM =	0.95

Tabla 4.3.5f. Cálculo de la precipitación para junio en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitac. por área cubierta (cm)	Precipitac. total (cm)
1	A. Nervo	100	8.03	8.03	8.03
2	A. Nervo	30	8.03	2.41	
	Jumatán	60	15.40	9.39	
	Tepic	10	16.42	1.64	13.44
3a	Jumatán	40	15.40	6.16	
	Tepic	60	16.42	9.85	16.01
3b	Tepic	100	16.42	16.42	16.42
4	Tepic	100	16.42	16.42	16.42
5	Tepic	100	16.42	16.42	16.42
6a	Tepic	100	16.42	16.42	16.42
6b	Tepic	70	16.42	11.49	
	Trigomil	15	16.90	2.54	
	Reflión	15	14.01	2.10	16.13
6c	Tepic	60	16.42	9.85	
	Trigomil	40	16.90	6.76	16.61
6d	Trigomil	75	16.90	12.68	
	Cerro Blanco	25	19.59	4.898	17.58
7	Tepic	80	16.42	13.14	
	Reflión	20	14.01	2.80	15.94
8	Trigomil	100	16.90	16.90	16.90
9	Trigomil	100	16.90	16.90	16.90
10	Trigomil	100	16.90	16.90	16.90
11	Trigomil	100	16.90	16.90	16.90
12a	Cerro Blanco	100	19.59	19.59	19.59
12b	Trigomil	100	16.90	16.90	16.90
13	Cerro Blanco	100	19.59	19.59	19.59
				PROM =	16.28

Tabla 4.3.5g. Cálculo de la precipitación para julio en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García et al., 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual	Precipitación por área cubierta	Precipitación total
			(cm)	(cm)	(cm)
1	A. Nervo	100	35.02	35.02	35.02
2	A. Nervo	30	35.02	10.51	
	Jumatán	60	34.44	20.66	
	Tepic	10	37.11	3.71	34.88
3a	Jumatán	40	34.44	13.78	
	Tepic	60	37.11	22.27	36.05
3b	Tepic	100	37.11	37.11	37.11
4	Tepic	100	37.11	37.11	37.11
5	Tepic	100	37.11	37.11	37.11
6a	Tepic	100	37.11	37.11	37.11
6b	Tepic	70	37.11	25.98	
	Trigomil	15	31.82	4.77	
	Refilión	15	28.46	4.27	35.02
6c	Tepic	60	37.11	22.27	
	Trigomil	40	31.82	12.73	34.99
6d	Trigomil	75	31.82	23.87	
	Cerro Blanco	25	36.41	9.10	32.97
7	Tepic	80	37.11	29.69	
	Refilión	20	28.46	5.69	35.38
8	Trigomil	100	31.82	31.82	31.82
9	Trigomil	100	31.82	31.82	31.82
10	Trigomil	100	31.82	31.82	31.82
11	Trigomil	100	31.82	31.82	31.82
12a	Cerro Blanco	100	36.41	36.41	36.41
12b	Trigomil	100	31.82	31.82	31.82
13	Cerro Blanco	100	36.41	36.41	36.41
				PROM =	34.70

Tabla 4.3.5h. Cálculo de la precipitación para agosto en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitación por área cubierta (cm)	Precipitación total (cm)
1	A. Nervo	100	36.61	36.61	36.61
2	A. Nervo	30	36.61	10.98	
	Jumatán	60	39.74	23.84	
	Tepic	10	28.84	2.88	37.71
3a	Jumatán	40	39.74	15.90	
	Tepic	60	28.84	17.30	33.20
3b	Tepic	100	28.84	28.84	28.84
4	Tepic	100	28.84	28.84	28.84
5	Tepic	100	28.84	28.84	28.84
6a	Tepic	100	28.84	28.84	28.84
6b	Tepic	70	28.84	20.19	
	Trigomil	15	30.79	4.62	
	Reflión	15	27.72	4.16	28.97
6c	Tepic	60	28.84	17.30	
	Trigomil	40	30.79	12.32	29.62
6d	Trigomil	75	30.79	23.09	
	Cerro Blanco	25	30.12	7.53	30.62
7	Tepic	80	28.84	23.07	
	Reflión	20	27.72	5.54	28.61
8	Trigomil	100	30.79	30.79	30.79
9	Trigomil	100	30.79	30.79	30.79
10	Trigomil	100	30.79	30.79	30.79
11	Trigomil	100	30.79	30.79	30.79
12a	Cerro Blanco	100	30.12	30.12	30.12
12b	Trigomil	100	30.79	30.79	30.79
13	Cerro Blanco	100	30.12	30.12	30.12
				PROM =	30.83

Tabla 4.3.5i. Cálculo de la precipitación para *septiembre* en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitación por área cubierta (cm)	Precipitación total (cm)
1	A. Nervo	100	31.75	31.75	31.75
2	A. Nervo	30	31.75	9.53	
	Jumatán	60	38.07	22.84	
	Tepic	10	22.72	2.27	34.64
3a	Jumatán	40	38.07	15.23	
	Tepic	60	22.72	13.63	28.86
3b	Tepic	100	22.72	22.72	22.72
4	Tepic	100	22.72	22.72	22.72
5	Tepic	100	22.72	22.72	22.72
6a	Tepic	100	22.72	22.72	22.72
6b	Tepic	70	22.72	15.90	
	Trigomil	15	25.72	3.86	
	Reflión	15	26.36	3.95	23.71
6c	Tepic	60	22.72	13.63	
	Trigomil	40	25.72	10.29	23.92
6d	Trigomil	75	25.72	19.29	
	Cerro Blanco	25	22.50	5.63	24.92
7	Tepic	80	22.72	18.18	
	Reflión	20	26.36	5.27	23.45
8	Trigomil	100	25.72	25.72	25.72
9	Trigomil	100	25.72	25.72	25.72
10	Trigomil	100	25.72	25.72	25.72
11	Trigomil	100	25.72	25.72	25.72
12a	Cerro Blanco	100	22.50	22.50	22.50
12b	Trigomil	100	25.72	25.72	25.72
13	Cerro Blanco	100	22.50	22.50	22.50
				PROM =	25.32

Tabla 4.3.5j. Cálculo de la precipitación para octubre en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitación por área cubierta (cm)	Precipitación total (cm)
1	*A. Nervo	100	7.67	7.67	7.67
2	A. Nervo	30	7.67	2.30	
	Jumatán	60	9.29	5.57	
	Tepic	10	6.90	0.69	8.56
3a	Jumatán	40	9.29	3.72	
	Tepic	60	6.90	4.14	7.86
3b	Tepic	100	6.90	6.90	6.90
4	Tepic	100	6.90	6.90	6.90
5	Tepic	100	6.90	6.90	6.90
6a	Tepic	100	6.90	6.90	6.90
6b	Tepic	70	6.90	4.83	
	Trigomil	15	10.81	1.62	
	Refilión	15	6.31	0.95	7.40
6c	Tepic	60	6.90	4.14	
	Trigomil	40	10.81	4.32	8.46
6d	Trigomil	75	10.81	8.11	
	Cerro Blanco	25	7.03	1.76	9.87
7	Tepic	80	6.90	5.52	
	Refilión	20	6.31	1.26	6.78
8	Trigomil	100	10.81	10.81	10.81
9	Trigomil	100	10.81	10.81	10.81
10	Trigomil	100	10.81	10.81	10.81
11	Trigomil	100	10.81	10.81	10.81
12a	Cerro Blanco	100	7.03	7.03	7.03
12b	Trigomil	100	10.81	10.81	10.81
13	Cerro Blanco	100	7.03	7.03	7.03
				PROM =	8.46

Tabla 4.3.5k. Cálculo de la precipitación para *noviembre* en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitación por área cubierta (cm)	Precipitación total (cm)
1	A. Nervo	100	1.55	1.55	1.55
2	A. Nervo	30	1.55	0.47	
	Jumatán	60	2.29	1.37	
	Tepic	10	1.45	0.15	1.99
3a	Jumatán	40	2.29	0.92	
	Tepic	60	1.45	0.87	1.79
3b	Tepic	100	1.45	1.45	1.45
4	Tepic	100	1.45	1.45	1.45
5	Tepic	100	1.45	1.45	1.45
6a	Tepic	100	1.45	1.45	1.45
6b	Tepic	70	1.45	1.02	
	Trigomil	15	2.87	0.43	
	Refilión	15	2.51	0.38	1.83
6c	Tepic	60	1.45	0.87	
	Trigomil	40	2.87	1.15	2.02
6d	Trigomil	75	2.87	2.15	
	Cerro Blanco	25	1.75	0.44	2.59
7	Tepic	80	1.45	1.16	
	Refilión	20	2.51	0.50	1.66
8	Trigomil	100	2.87	2.87	2.87
9	Trigomil	100	2.87	2.87	2.87
10	Trigomil	100	2.87	2.87	2.87
11	Trigomil	100	2.87	2.87	2.87
12a	Cerro Blanco	100	1.75	1.75	1.75
12b	Trigomil	100	2.87	2.87	2.87
13	Cerro Blanco	100	1.75	1.75	1.75
				PROM =	2.06

Tabla 4.3.5I. Cálculo de la precipitación para *diciembre* en cada zona, de acuerdo con la influencia de las estaciones pluviométricas. Cuenca del río Tepic, Nayarit (García *et al.*, 1999).

Zona	Estación pluviométrica	% de área total de cada zona, cubierta por la estación pluviométrica	Precipitación mensual (cm)	Precipitación por área cubierta (cm)	Precipitación total (cm)
1	A. Nervo	100	2.03	2.03	2.03
2	A. Nervo	30	2.03	0.61	
	Jumatán	60	2.81	1.68	
	Tepic	10	2.68	0.27	2.56
3a	Jumatán	40	2.81	1.12	
	Tepic	60	2.68	1.61	2.73
3b	Tepic	100	2.68	2.68	2.68
4	Tepic	100	2.68	2.68	2.68
5	Tepic	100	2.68	2.68	2.68
6a	Tepic	100	2.68	2.68	2.68
6b	Tepic	70	2.68	1.88	
	Trigomil	15	2.98	0.45	
	Refilión	15	2.84	0.43	2.75
6c	Tepic	60	2.68	1.61	
	Trigomil	40	2.98	1.19	2.80
6d	Trigomil	75	2.98	2.24	
	Cerro Blanco	25	2.12	0.53	2.77
7	Tepic	80	2.68	2.144	
	Refilión	20	2.84	0.57	2.71
8	Trigomil	100	2.98	2.98	2.98
9	Trigomil	100	2.98	2.98	2.98
10	Trigomil	100	2.98	2.98	2.98
11	Trigomil	100	2.98	2.98	2.98
12a	Cerro Blanco	100	2.12	2.12	2.12
12b	Trigomil	100	2.98	2.98	2.98
13	Cerro Blanco	100	2.12	2.12	2.12
				PROM =	2.68

ANEXO 3

REGISTROS HISTÓRICOS DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES (MM), EN LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA ZONA DE ESTUDIO DEL RÍO TEPIC

Tabla 4.3.7a

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

GERENCIA ESTATAL EN NAYARIT

SUBGERENCIA TÉCNICA

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA

Latitud: 21º 22' 36"

Longitud: 104º 37' 06"

Precipitación en mm Estación: Cerro Blanco

Altitud: 1 000 m.s.n.m.

Estado: Nayarit

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1963	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	270.1	377.2	175.0	223.6	62.5	5.2	48.0	1 161.6
1964	11.4	2.4	0.2	0.0	0.0	393.3	358.7	395.9	258.8	125.7	4.0	22.4	1 572.8
1965	39.0	9.6	0.0	24.6	0.0	76.8	362.9	390.4	232.2	39.1	0.5	56.8	1 231.9
1966	23.9	38.0	0.0	57.5	5.3	282.7	468.9	567.7	224.2	131.1	0.0	6.5	1 805.8
1967	71.0	0.0	0.0	0.0	7.9	347.0	301.7	467.4	303.2	130.1	0.0	15.7	1 644.0
1968	2.8	28.8	142.0	0.0	0.3	251.0	315.4	354.9	184.4	117.8	38.7	42.6	1 478.7
1969	2.2	5.0	0.5	0.0	INAP	94.3	344.1	325.1	201.6	85.3	3.3	68.4	1 129.8
1970	1.5	51.6	0.0	0.0	1.1	147.7	389.4	348.8	289.9	9.1	23.7	0.0	1 262.8
1971	14.7	0.0	INAP	0.0	38.3	196.6	387.9	211.4	290.3	122.4	0.0	INAP	1 261.6
1972	20.6	0.0	INAP	0.0	13.2	186.2	321.6	250.9	251.6	21.5	101.7	6.5	1 173.8
1973	45.4	18.0	INAP	0.0	INAP	71.2	364.8	350.4	456.7	73.5	3.9	2.7	1 386.6
1974	INAP	0.0	2.1	INAP	54.9	250.2	363.6	267.4	165.5	7.8	24.6	62.7	1 198.8
1975	10.6	INAP	0.0	0.0	INAP	307.4	427.5	236.7	180.1	17.6	0.0		1 179.9
1976	INAP	0.8	0.0	INAP	0.0	137.7	385.2	393.7	237.6	31.5	130.0	51.6	1 368.1
1977	8.0	0.0	INAP	1.5	3.9	185.2	521.1	267.4	249.9	105.0	0.7	1.7	1 344.4
1978	0.9	20.5	0.0	0.0	3.5	388.9	370.7	225.9	334.2	62.8	2.4	INAP	1 409.8
1979	24.1	5.0	0.0	0.0	0.0	70.6	493.1	210.0	137.4	29.5	0.0	7.9	977.6
1980	32.1	21.4	0.0	2.3	0.0	185.1	435.9	260.4	215.4	123.3	10.7	15.7	1 302.3
1981	40.1	0.0	8.4	17.3	INAP	244.3	382.1	184.5	172.4	32.3	0.5	13.7	1 095.6
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	INAP	155.4	307.1	241.0	127.6	144.5	59.0	91.9	1 126.5
1983	49.1	2.0	15.0	0.0	56.8	28.8	483.8	315.5	238.5	49.9	13.4	0.0	1 252.8
1984	56.7	0.0	0.0	0.0	26.6	243.2	373.3	357.2	150.7	6.8	INAP	20.3	1 234.8
1985	45.1	0.4	0.0	INAP	INAP	184.7	336.4	294.0	188.7	25.7	2.0	17.8	1 094.8

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1986	0.0	10.9	0.0	INAP	0.0	216.2	289.0	186.4	224.9	33.4	24.2	16.2	1 001.2
1987	111.1	64.9	INAP	0.0	13.0	182.0	330.2	334.9	224.6	INAP	2.5	5.7	1 268.9
1988	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	352.1	322.2	261.0	162.7	77.0	0.0	1.2	1 177.5
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.4	416.8	259.5	97.0	60.8	65.3	32.1	950.9
1990	1.5	28.6	0.0	0.0	1.1	256.6	466.0	227.1	271.1	83.5	0.0	0.0	1 335.5
1991	1.2	0.5	0.0	0.0	0.0	208.0	382.0	298.6	228.4	64.6	18.4	42.4	1 244.1
1992	232.7	21.4	0.0	2.2	21.9	34.2	266.9	251.3	130.2	113.1	22.4	39.8	1 136.1
1993	34.4	0.0	0.0	0.0	0.0	214.0	305.9	265.6	243.5	42.8	2.4	0.0	1 108.6
1994	0.4	0.0	1.8	0.0	4.1	159.1	290.6	381.4	213.2	54.9	0.4	3.2	1 109.1
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	221.1	301.3	299.8	232.1	INAP	9.8	19.6	1 083.7
1996	0.0	INAP	0.0	INAP	INAP	232.2	265.2	385.8	298.2	201.3	5.1	INAP	1 387.8
1997	65.2	15.8	21.4	39.9	16.4	64.2	235.0	298.4	235.8	172.7	36.0	8.4	1 209.2
n	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	34	
TOTAL	945.7	345.6	192.7	145.3	268.3	6857.5	12743.5	10541	7876.2	2458.9	610.8	721.5	43 707
PROM	27.0	9.9	5.5	4.2	7.7	195.9	364.1	301.2	225.0	70.3	17.5	21.2	1 249.4

Tabla 4.3.7b

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

GERENCIA ESTATAL EN NAYARIT

SUBGERENCIA TÉCNICA

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA

Latitud: 21° 22' 29"

Longitud: 104° 47' 30"

Precipitación en mm Estación: Trigomil

Altitud: 990 m.s.n.m. Estado: Nayarit

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1981					0.0	128.5	291.5	175.3	126.0	60.5	0.0	19.5	801.3
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	128.5	158.2	123.5	95.8	85.0	138.2	827.2
1983	56.0	2.5	21.1	0.0	86.8	55.0	505.0	325.9	190.6	87.2	13.0	0.0	1 343.1
1984	49.0	0.0	0.0	0.0	48.7	289.5	352.0	259.0	227.6	113.9	10.0	86.6	1 436.3
1985	95.3	0.0	0.0	0.0	0.0	174.2	342.9	292.6	248.0	38.0	49.0	15.7	1 255.7
1986	0.0								297.5	90.0	2.9	0.0	390.4
1987	184.1	0.0	0.0	0.0		45.7	287.3	240.2	269.0	0.0	0.0	0.0	1 026.3
1988	INAP					160.0	260.0	335.7	223.0				978.7
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	333.1	326.8	290.0	70.0	56.5	20.5	1 135.9
1990	0.0	45.0	0.0	0.0	0.0	307.0	426.0	428.0	221.0	150.0	0.0	0.0	1 577.0
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	175.0	351.1	254.5	216.6	86.0	67.0	40.5	1 190.7
1992	253.8	118.1	3.0	3.0	4.0	61.0	270.4	264.5	191.3	160.0	45.0	90.9	1 465.0
1993	43.3	0.0	0.0	0.0	0.0	303.9	350.0	393.0	435.3	66.6	10.9	0.0	1 603.0
1994	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	211.5	195.1	417.0	355.7	167.9	13.0	17.6	1 379.8
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	241.2	454.0	227.0	250.0	163.4	10.0	18.0	1 363.6
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	224.5	285.0	370.0	495.0	160.0	17.0	0.0	1 551.5
1997	123.0	39.0	16.0			190.7	259.0	458.6	211.5	221.0	80.0		1 598.8
ENE	16	14	14	12	13	16	16	16	17	16	16	15	
TOTAL	804.5	204.6	40.1	3	141.5	2 704.7	5 090.9	4 926.3	4 371.6	1 730.3	459.3	447.5	20 924.3
PROM	50.281	14.614	2.864	0.25	10.88	169.04	318.18	307.89	257.15	108.1	28.706	29.83	1 297.85

INAP = Inapreciable, se le considera como cero

n = Número total de registros

Tabla 4.3.7c

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

GERENCIA ESTATAL EN NAYARIT

SUBGERENCIA TÉCNICA

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA

Latitud: 21° 43' 30"

Longitud: 105° 02' 00"

Estación: Amado Nervo, Gileño

Precipitación en mm

Altitud: 32 m.s.n.m.

Estado: Nayarit

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1977										67.3	1.4	0.0	68.7
1978	0.0	3.5	0.0	0.5	1.2	86.2	464.0				7.0		562.4
1979	48.9	2.2	0.0	0.0	0.0	6.6	222.9	181.0	426.0	0.0	0.0	12.5	900.1
1980	23.6	18.3	0.0	INAP	0.0	94.6	253.9	403.0	482.0	52.1	27.0		1 354.5
1981	53.0	0.0	2.0	0.0	2.0		474.9	194.0	293.8	228.9	INAP	15.0	1 263.6
1982							308.8	118.6	235.5	132.2	56.5	97.1	948.7
1983	51.0	6.1	11.3	0.0	106.8	6.4	278.3	321.3	281.2	95.1	31.6	INAP	1 189.1
1984	61.8	0.0	0.0	0.0	0.0	214.2	316.4	511.4	175.3	13.4	8.8	45.0	1 346.3
1985	82.8	0.0	0.0	0.0			418.5	314.5	279.1	59.0	8.5	15.0	1 177.4
1986					1.7	24.0				70.0	0.0	7.0	102.7
1987	214.4	49.5	0.0	0.0	0.0	INAP	473.4	265.0	294.9	82.8	INAP	1.8	1 381.8
1988	0.0	0.0	INAP	0.0	18.0	83.5	264.4	373.3	470.0	20.0	0.0	0.0	1 229.2
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.4	453.4	395.7	289.5	28.5	35.3	47.2	1 324.0
1990	0.0	20.0	0.0	0.0	1.0	147.5	644.8	308.2	499.9	60.5	0.0	0.0	1 681.9
1991	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	100.3	159.8	284.7	222.8	110.9	25.0	49.0	953.5
1992	181.0	44.3	0.0	0.0	12.5	44.5	372.1	369.5	307.5	132.9			1 464.3
1993													
1994	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5	365.0	606.0	281.0	72.0	0.0	23.0	1 387.5
1995	INAP	0.0	0.0	0.0	0.0	128.0	268.9	462.5	288.2	2.5	0.0	11.4	1 161.5
1996	0.0	0.0	0.0	INAP	INAP	57.0	243.4	468.0	493.5	79.0	22.0	0.0	1 362.9
1997	44.3	18.5	6.3	19.5	0.0	176.5	320.2	647.0	78.0	150.0	71.5		1 531.8
ENE	17	16	17	16	17	16	18	17	17	19	19	16	ANUAL
n													
TOTAL	760.8	163.4	19.6	20	143.2	1 284.2	6 303.1	6 223.7	5 398.2	1 457.1	294.6	324	18 000.2
PROM	44.75	10.213	1.1529	1.25	8.424	80.263	350.17	366.1	317.54	76.69	15.505	20.25	1 292.31

INAP = Inapreciable, se le considera como cero

n = Número total de registros

Tabla 4.3.7d

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

GERENCIA ESTATAL EN NAYARIT

SUBGERENCIA TÉCNICA

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA

Latitud: 21° 23' 00"

Longitud: 104° 48' 00"

Precipitación en mm Estación: Tepic

Altitud: 920 m.s.n.m.

Estado: Nayarit

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1949			0.0		5.2	128.3	198.2	208.6	264.4	56.8	0.0	0.0	861.5
1950	0.0	0.0	2.0	0.0	21.3	246.8	496.0	288.0	260.2	98.7	0.0	2.5	1 415.5
1951	17.5	0.0	4.0	0.0	0.0	101.1	257.5	132.3	252.7	89.7	4.5	0.0	859.3
1952	0.0	0.0	0.0	19.2	7.0	315.3	403.7	290.2	227.9	50.0	12.7	11.0	1 337.0
1953	0.0	11.3	0.0	0.0	0.0	93.9	365.0	290.5	89.6	78.8	2.5	72.8	1 004.4
1954	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	133.1	266.7	221.1	189.7	74.3	0.0	0.0	884.9
1955	40.2	0.0	0.0	0.0	INAP	37.0	476.5	337.2	332.8	182.4	0.0	0.0	1 406.1
1956	1.1	3.0	0.0	0.0	81.1	274.4	438.9	183.5	164.6	47.8	0.7	0.6	1 195.7
1957	INAP	INAP	INAP	INAP	0.8	29.7	346.9	173.7	97.4		INAP	INAP	648.5
1958	21.2	1.7	49.7	0.0	50.5	359.7	437.3	176.6	217.8	189.9	45.1	4.6	1 554.1
1959	4.7	0.0	INAP	INAP	0.0	283.7	342.6	284.8	93.8	141.1	1.9	38.0	1 190.6
1960	4.3	2.4	0.0	0.0	0.0	79.7	372.6	158.9	216.0	72.6	0.0	138.5	1 045.0
1961	50.7	0.0	0.0	3.3	0.0	226.6	443.7	258.3	140.3	97.7	2.5	1.6	1 224.7
1962	54.5	28.3	0.0	1.0	0.0	297.9	325.4	320.6	233.3	70.6	8.8	6.2	1 346.6
1963	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	152.4	511.4	254.3	129.8	22.8	9.2	50.1	1 130.6
1964	15.5	2.0	0.0	0.0	0.0	216.6	364.0	317.5	278.8	48.6	0.0	16.9	1 259.9
1965	30.5	4.9	0.0	0.4	0.7	62.7	434.3	308.4	287.3	56.0	0.6	64.1	1 249.9
1966	29.7	48.4	1.1	62.8	2.2	292.2	307.4	334.5	218.0	106.6	0.0	10.5	1 413.4
1967	116.7	0.0	0.0	0.0	0.0	221.4	252.3	387.8	381.0	91.1	0.0	21.6	1 471.9
1968	1.2	27.5	177.1	0.0	0.0	120.0	282.7	268.0	137.4	78.9	38.1	62.0	1 192.9
1969	0.0	9.8	0.0	0.0	0.0	131.4	388.5	369.9	195.0	150.7	0.0	85.6	1 330.9
1970	2.9	76.4	0.0	0.0	0.0	179.1	408.2	258.4	189.8	6.2	21.1	0.0	1 142.1
1971	11.1	0.0	0.0	0.0	INAP	280.6	369.2	327.9	275.2	149.6	0.0	0.0	1 413.6

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1972	74.9	0.0	0.0	0.0	INAP	120.3	281.4	213.6	132.3	36.2	81.3	29.9	969.9
1973	60.5	24.7	2.8	INAP	0.0	88.6	379.5	271.3	135.5	52.0	0.0	INAP	1 014.9
1974	0.0	0.0	0.0	INAP	63.8	364.2	254.1	163.2	138.7	6.5	38.0	72.3	1 100.8
1975	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	210.4	451.2	232.1	180.8	22.2	0.0	0.0	1 107.1
1976	0.0	INAP	0.0	0.0	0.0	129.1	294.1	382.9	202.2	9.9	140.8	61.8	1 220.8
1977	11.9	0.0	INAP	6.0	0.0	148.9	474.3	302.5	284.8	52.8	INAP	5.0	1 286.2
1978	INAP	47.8	0.0	0.0	2.0	140.3	316.6	340.6	281.6	95.2	0.0	1.8	1 225.9
1979	46.8	13.6	0.0	0.0	0.0	37.9	481.2	316.4	175.1	2.0	0.0	0.0	1 073.0
1980	44.0	27.6	0.0	7.3	0.0	150.7	168.7	487.8	329.8	98.3	2.3	16.1	1 332.6
1981	67.9	INAP	0.0	2.2	INAP	243.9	442.7	229.8	339.4	75.7	INAP	20.0	1 421.6
1982	INAP	0.0	0.0	0.0	0.0	54.3	388.4	171.3	198.2	33.1	80.9	130.0	1 056.2
1983	44.1	INAP	25.7	INAP	61.8	26.2	534.1	467.9	318.0	34.7	31.3	INAP	1 543.8
1984	79.2	INAP	INAP	0.0	27.7	234.9	382.0	470.6	240.1	29.6	5.5	97.8	1 567.4
1985	93.2	7.5	INAP	0.0	INAP	139.7	340.7	305.4	251.6	22.6	INAP	22.6	1 183.3
1986	INAP	15.8	0.0	INAP	1.2	152.4	231.7	372.6	335.0	60.2	0.0	7.8	1 176.7
1987	181.2	INAP	0.0	0.0	0.0	INAP	358.1	239.0	222.9	16.3	0.0	11.7	1 029.2
1988	3.7	0.0	13.4	1.6	26.4	252.9	534.8	402.3	264.3	0.0	0.0	0.0	1 499.4
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	404.1	298.0	278.2	69.5	58.5	24.5	1 171.8
1990	0.5	43.0	0.0	0.0	6.5	221.8	480.0	360.5	281.5	56.5	INAP	0.0	1 450.3
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	197.0	270.2	222.0	306.4	164.5	37.0	62.5	1 259.6
1992	296.5	0.0	0.0		37.5	10.0							344.0
n	43	43	44	42	44	44	43	43	43	42	43	43	
TOTAL	1417	396.3	275.8	103.8	395.7	7 226.1	15 957	12 401	9 769	2 899	623.3	1 150.4	51 621.1
PROM	32.94	9.2163	6.2682	2.4714	8.9932	164.23	371.1	288.39	227.2	69.02	14.495	26.753	1 221.06

INAP = Inapreciable, se le considera como cero

n = Número total de registros

Tabla 4.3.7e

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

GERENCIA ESTATAL EN NAYARIT

SUBGERENCIA TÉCNICA

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA

Latitud: 21º 34'

Longitud: 104º 58'

Estación: Jumatán

Altitud: 365 m.s.n.m.

Estado: Nayarit

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1942											2	0	2
1943	30	0	0	0	0	65	218	265	403				981
1944									333	34	90	0	457
1945	0	60	0	0									60
1947											21	0	21
1948			2	10		425	339	295	201	33	23	1	1 329
1949	23	1	0	2	4	156	321	251	273	123			1 154
1950						263	441	402	626	178			1 910
1951	7												7
1952										8		36	44
1953	0	15	0	2	0	116	359	335	104		0	68	999
1954	0	0	0	0	0	215	301	333	471	168	0	0	1 488
1955	48	6	0	0	0	48	418	753	534	31	0		1 838
1956	3	0	0	0	25	378	236	404	216	37	0	0	1 299
1957	0	0	0	0	0	44	289	238	151	73	2	1	798
1958	41	5	58	1	40	276	554	542	478	242	122	24	2 383
1959	2	0	0	210	0	380	364	555	261	168	0	45	1 985
1960	6	0	0	0	0	89	263	210	384	130	0	135	1 217
1961	49	0	0	4	0	207	547	509	277	56	1	10	1 660
1962	31	57	0	0	0	222	228	347	528	200	92	1	1 706
1963	0	2	0	0	0	173	494	312	293	86	13	63	1 436

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1964	11	3	7	0	0	62	249	459	231	59	0	11	1092
1965	28	15	0	0	0	53	336	356	407	26	0	108	1 329
1966	23	50	0	22	0	235	331	418	504	147	0	16	1 746
1967	136	0	0	0	2	129	143	442	539	141	0	16	1 548
1968	0	19	155	0	0	55	235	508	293	39	80	46	1 430
1970	5	49	0	0	0	148	516	538	374	38	12	0	1 680
1971	5	0	0	0	0	149	310	416	633		0	0	1 513
1972	61	0	0	0	0	190	210	528	418	57	119	19	1 602
1973	34	30	0	1	0	102	398	495	554	128	0	9	1 751
1974	0	0	0	0	107	231	288	365	236	34	7	70	1 338
1975	5	0	0	0	0	113	465	180	324	77	0	4	1 168
1976						302	234	412	113	33	126	83	1 303
1977	13					66	207	426	739	137	2	0	1 590
1978	1	58	0	3	4	120	627	427	464	231	1	0	1 936
1979	61	10	0	0	0	35	563	367	389	0	0	17	1 442
1980	27	27	0	4	0	59	312	665	444	64	54	9	1 665
1981	77	0	6	0	0	116	278	183	433	122	3	6	1 224
1982	0	0	0	0	0	42	278	213	166	189	69	109	1 066
1983	46	16	28	0	154	0	440	496	457	125	0	0	1 762
1984	85	0	0	0	8						0	105	198
1985		0	0	0		203	378	251	248	20	0	5	1 105
1988	0	0	0	0	0	147	209		540	23	0	0	919
1989	0	0	0	0	0	75	363	411	426	88	33	50	1 446
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
n	36	35	37	37	35	37	37	36	38	36	38	38	
TOTAL	858	423	256	259	344	5 689	12 742	14 307	14 465	3 345	872	1 067	54 627
PROM	23.8	12	6.92	7	9.8	154	344	397.4	381	92.9	22.9	28.08	1 480

INAP = Inapreciable, se le considera como cero

n = Número total de registros

Tabla 4.3.7f

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
GERENCIA ESTATAL EN NAYARIT
 SUBGERENCIA TÉCNICA
 DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA

Latitud:	21º 20'												
Longitud:	104º 50'	Estación: Compostela, El Refilión											
Altitud:	0 m.s.n.m.	Estado: Nayarit											
		Precipitación en mm											
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1989	0	0	0	0	0	75	363	411	426	88	33	50	1 446
1969	1	17	1	0	0	44	375	375	250	96	3	129	1 291
1970	3	78	0	0	0	193	389	238	228	15	16	0	1 160
1971	16	0	0	0	5	211	293	364	530	120	0	1	1 540
1972	87	0	0	0	4	127	313	154	270	46	101	18	1 120
1973	41	31	0	2	0	135	381	329	294	76	2	4	1 295
1974	0	0	0	0	62	316	323	285	205	21	4	87	1 303
1975	8	0	0	0	0	267	344	348	309	45	0	1	1 322
1976	0	0	0	0	0	273	231	432	146	19	170	38	1 309
1977	7	0	8	3	0	82	282	269	317	95	1	0	1 064
1978	0	46	0	2	1	182	249	311	482	118	2	0	1 393
1979	76	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	115
1980	64	30	0	4	0	134	0	332	307	24	28	18	941
1981	60	0	6	0	0	0	472	233	213	86	0	15	1 085
1982	0	0	0	0	0	117	270	162	151	105	49	79	933
1983	80	13	11	0	59	21	347	326	252	80	1	0	1 190
n	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
TOTAL	443	218	26	11	131	2 102	4 269	4 158	3 954	946	377	426	17 061
PROM	29.5	14.5	1.733	0.73	8.733	140.1	284.6	277.2	263.6	63.07	25.1	28.4	1 137.4

INAP = Inapreciable, se le considera como cero

n = Número total de registros

ANEXO 4

CAUDALES MENSUALES REGISTRADOS
EN EL RÍO SANTIAGO, PARA EL PERIODO
ANTERIOR (1955 - 1994) Y POSTERIOR
(1995 - 2005) A LA CONSTRUCCIÓN DE LA
PRESA AGUAMILPA

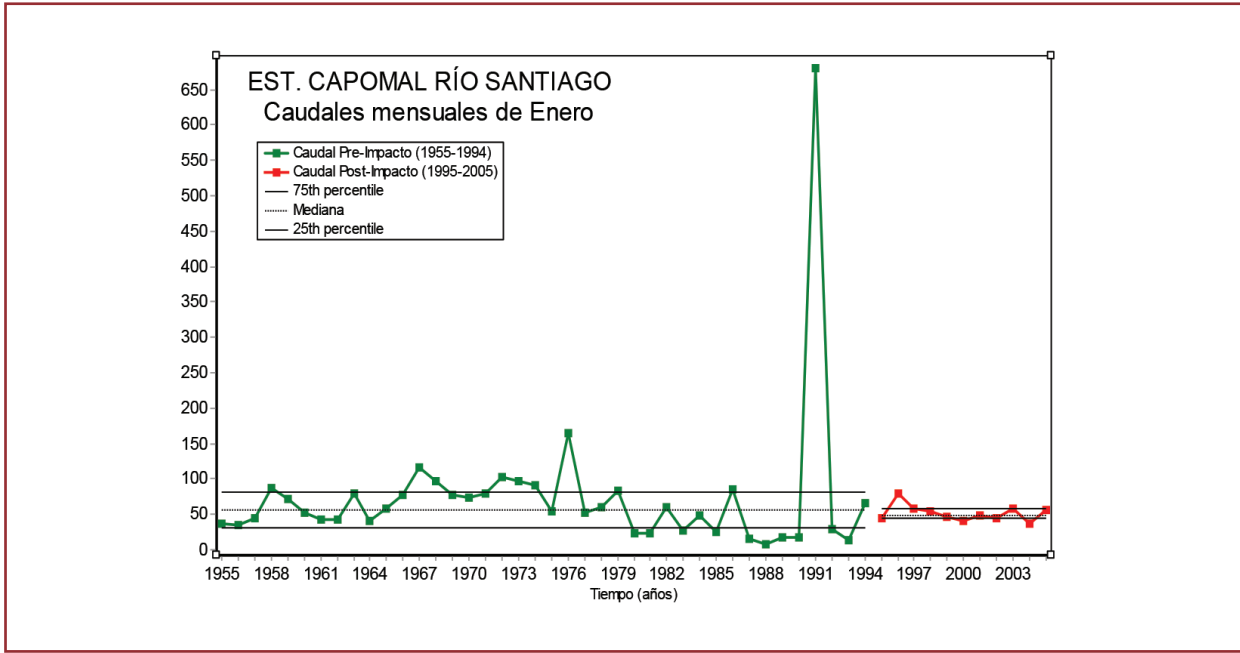


Figura 4.4.3.7.1. Caudal mensual registrado para el mes de *enero* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

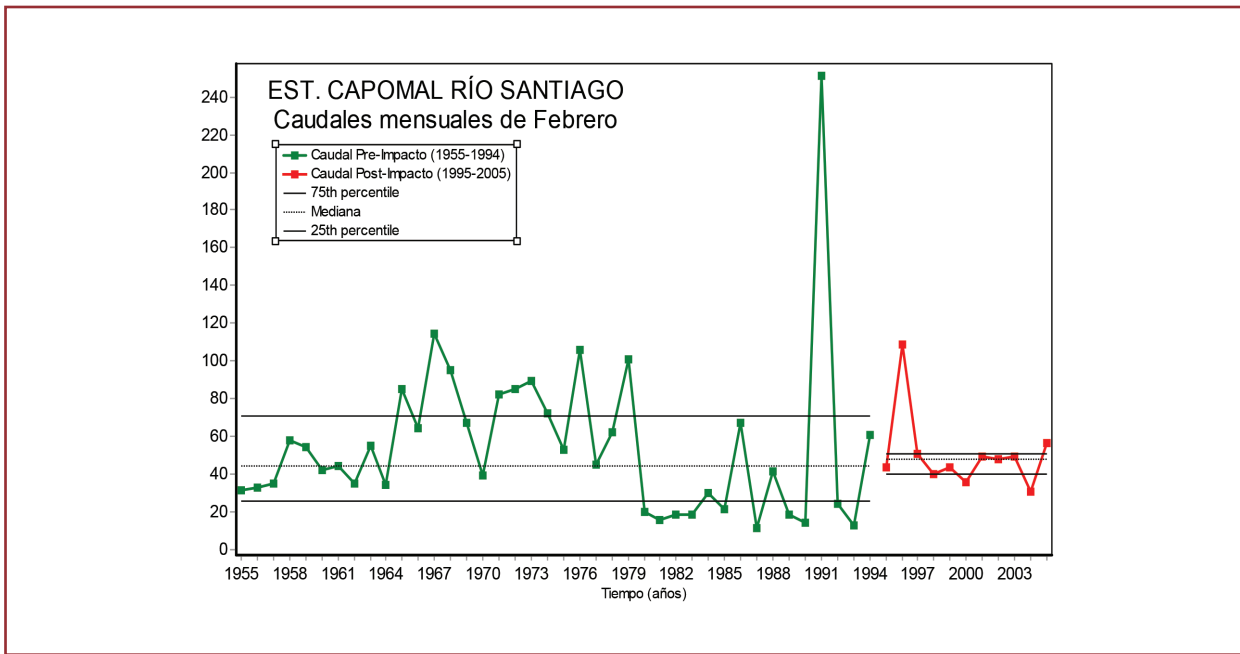


Figura 4.4.3.7.2. Caudal mensual registrado para el mes de *febrero* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

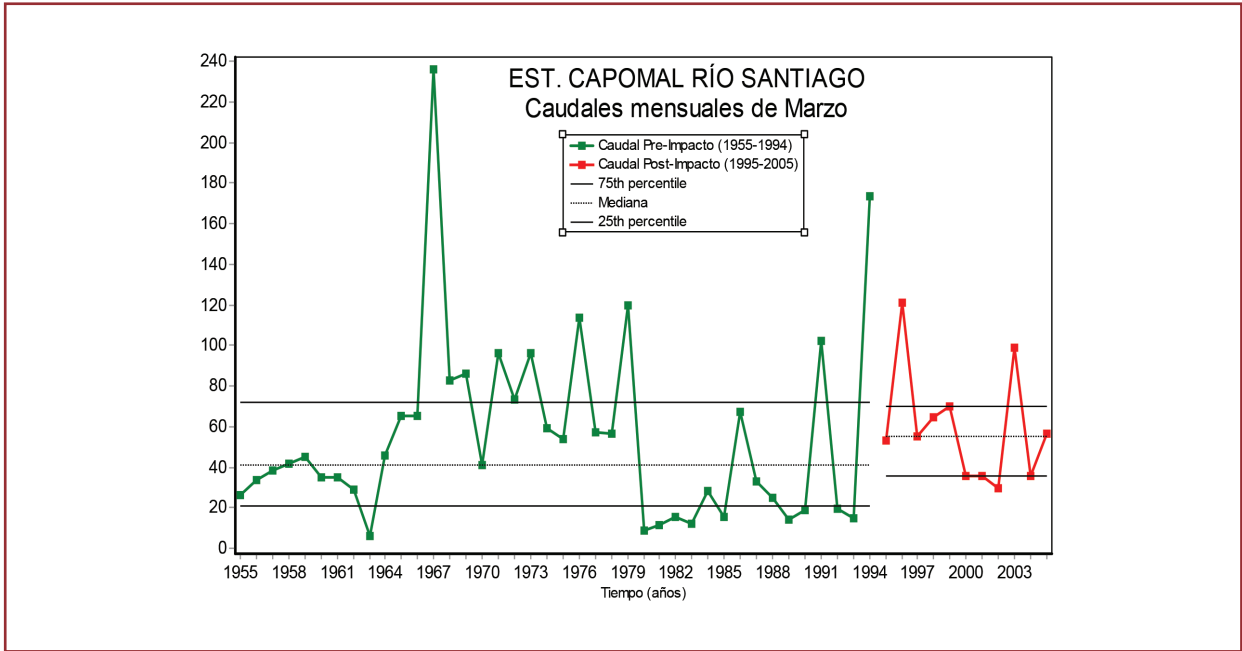


Figura 4.4.3.7.3. Caudal mensual registrado para el mes de *marzo* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

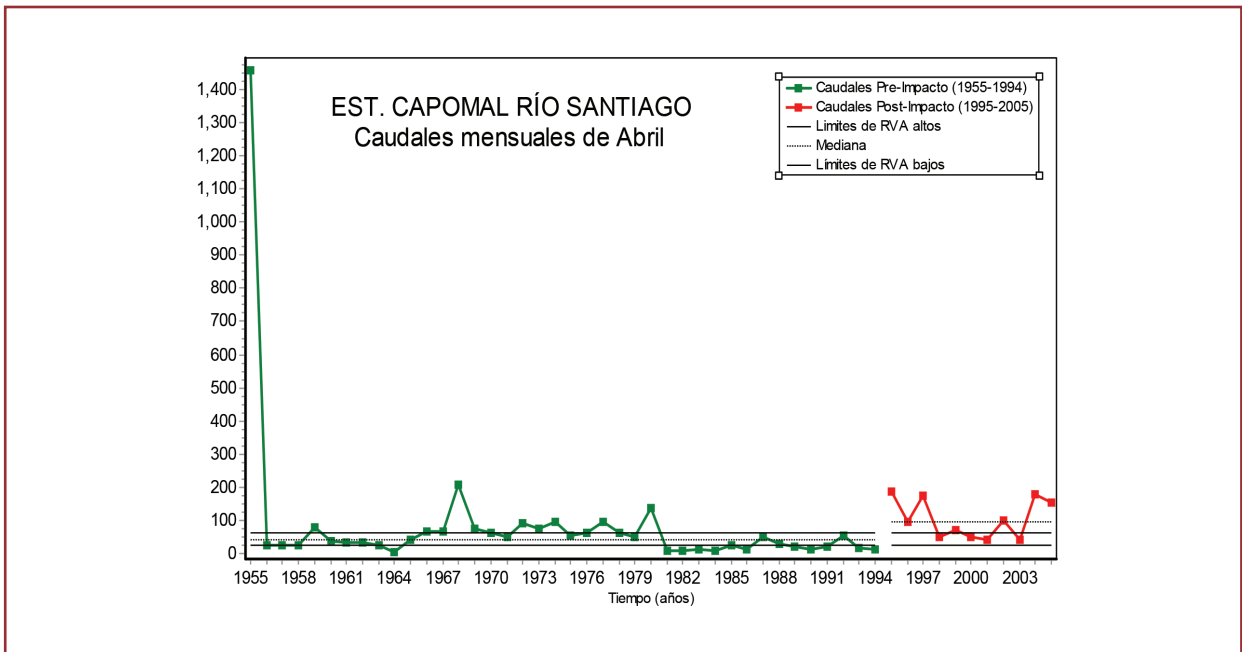


Figura 4.4.3.7.4. Caudal mensual registrado para el mes de *abril* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

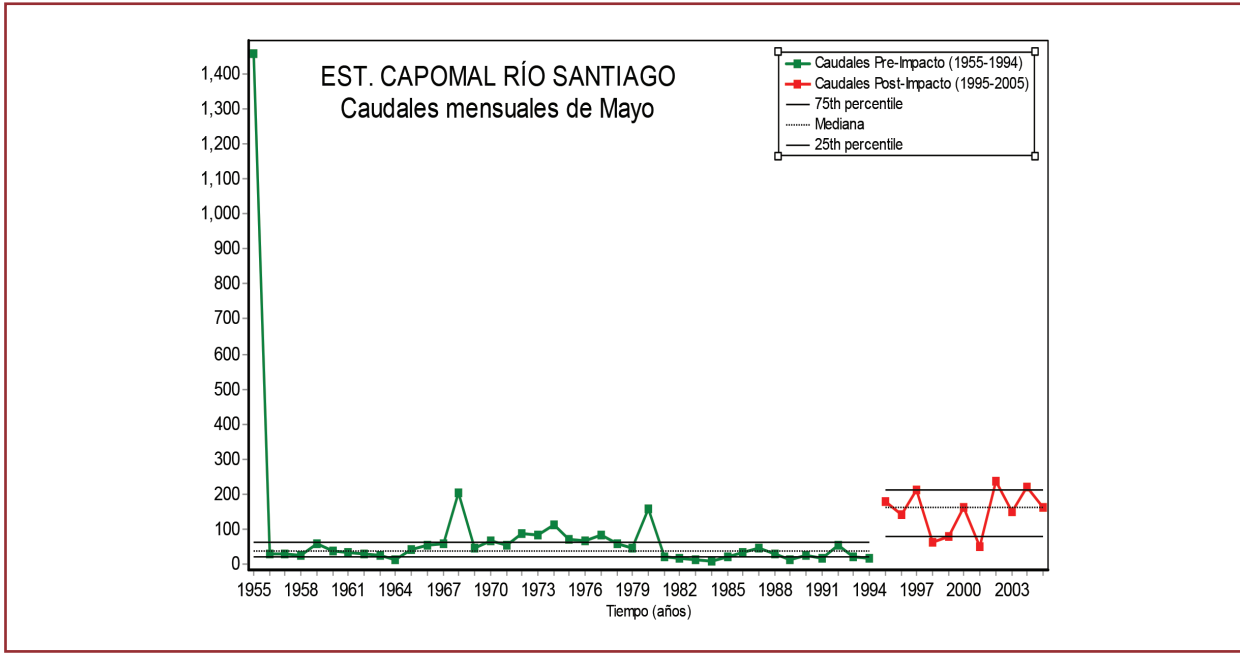


Figura 4.4.3.7.5. Caudal mensual registrado para el mes de *mayo* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

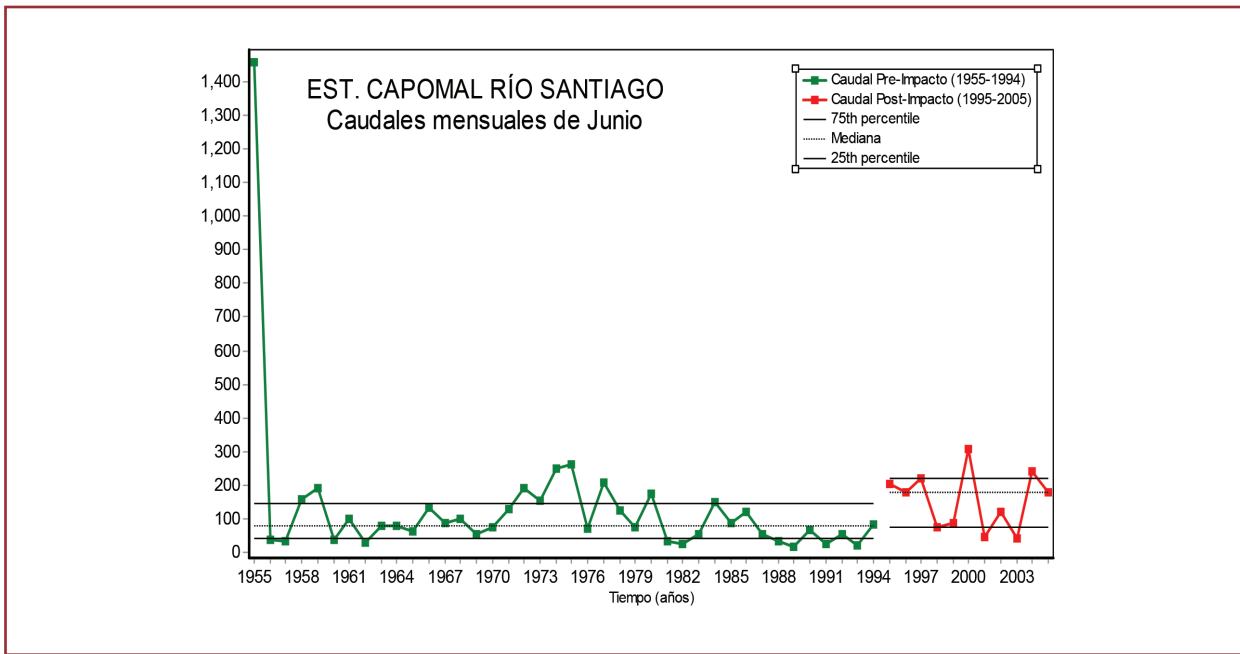


Figura 4.4.3.7.6. Caudal mensual registrado para el mes de *junio* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

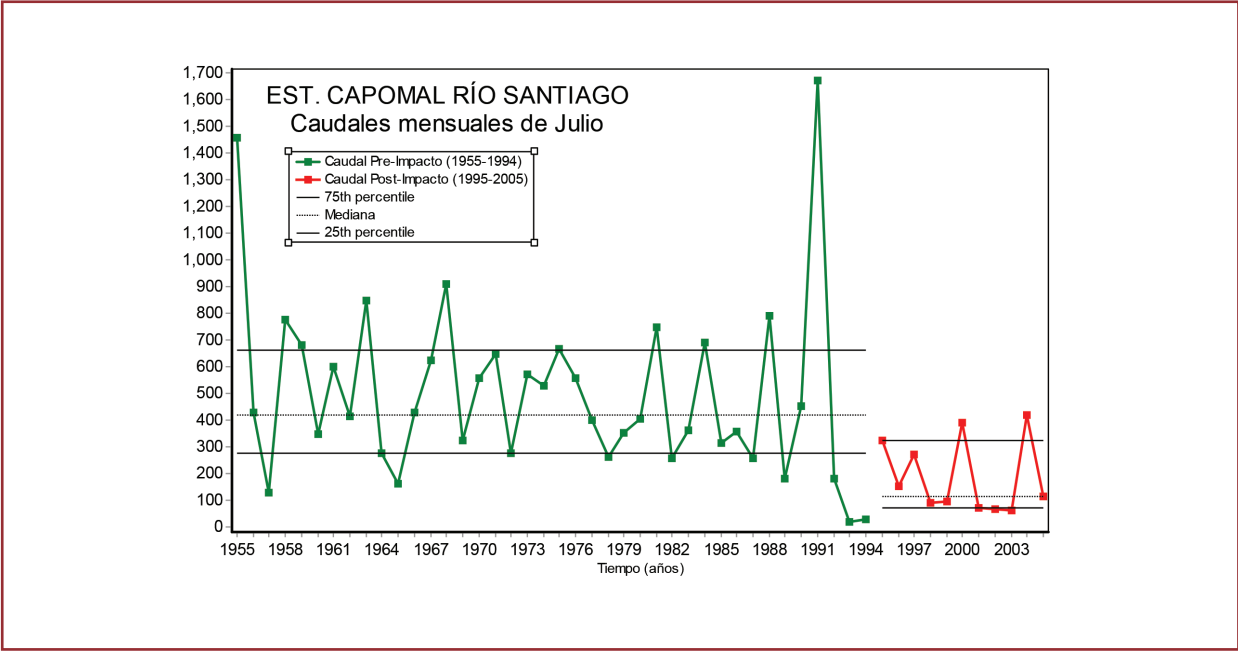


Figura 4.4.3.7.7. Caudal mensual registrado para el mes de *julio* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

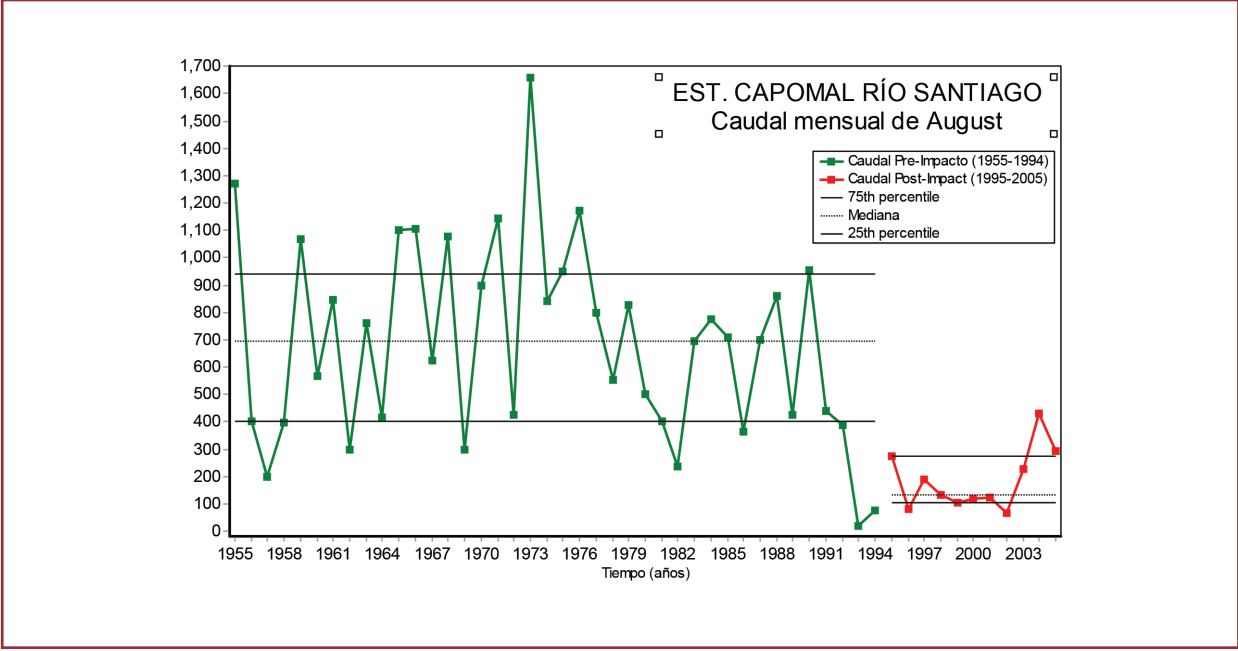


Figura 4.4.3.7.8. Caudal mensual registrado para el mes de *agosto* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

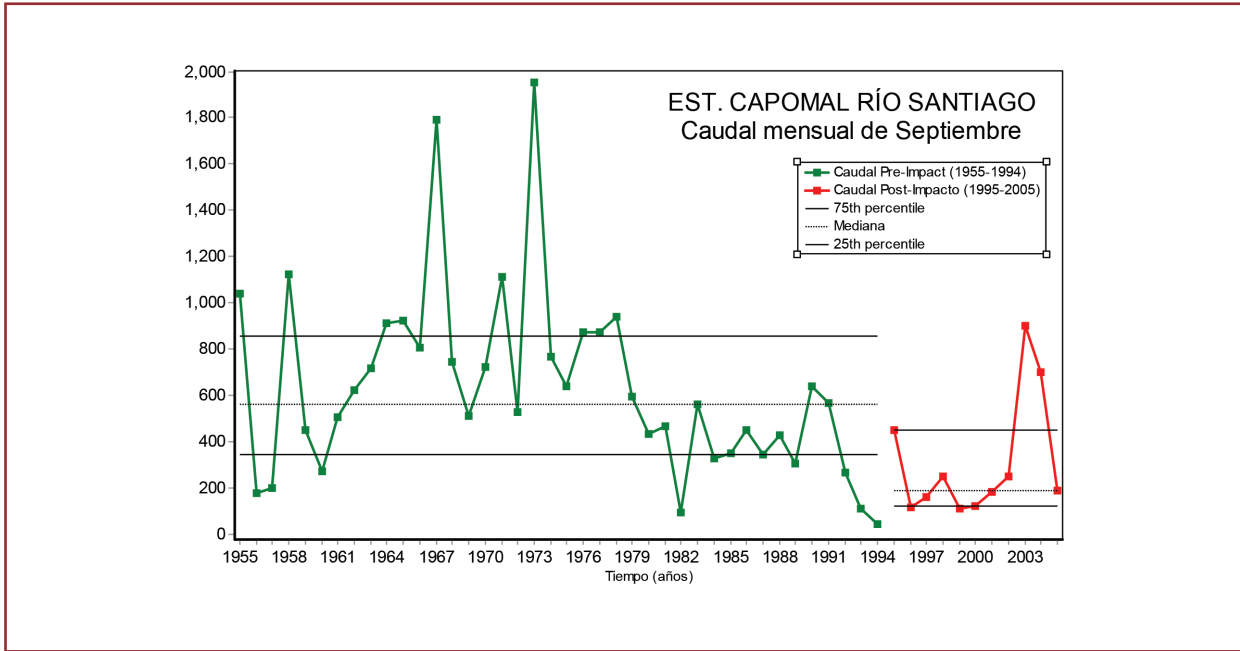


Figura 4.4.3.7.9. Caudal mensual registrado para el mes de *septiembre* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

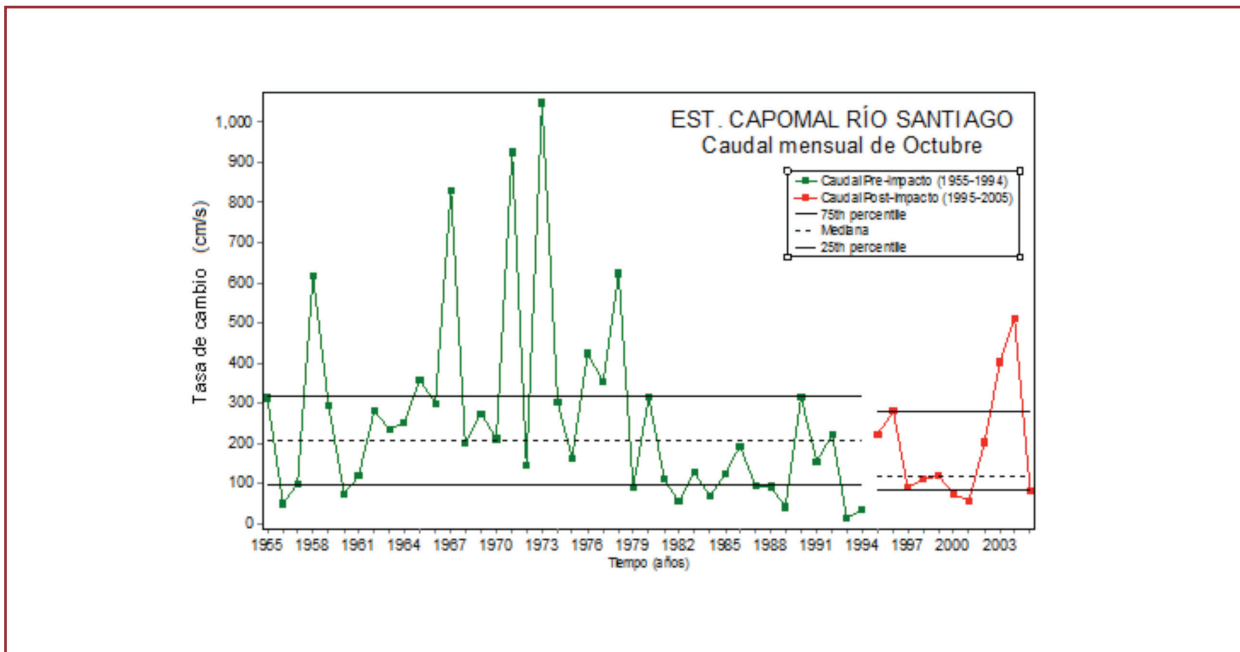


Figura 4.4.3.7.10. Caudal mensual registrado para el mes de *octubre* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

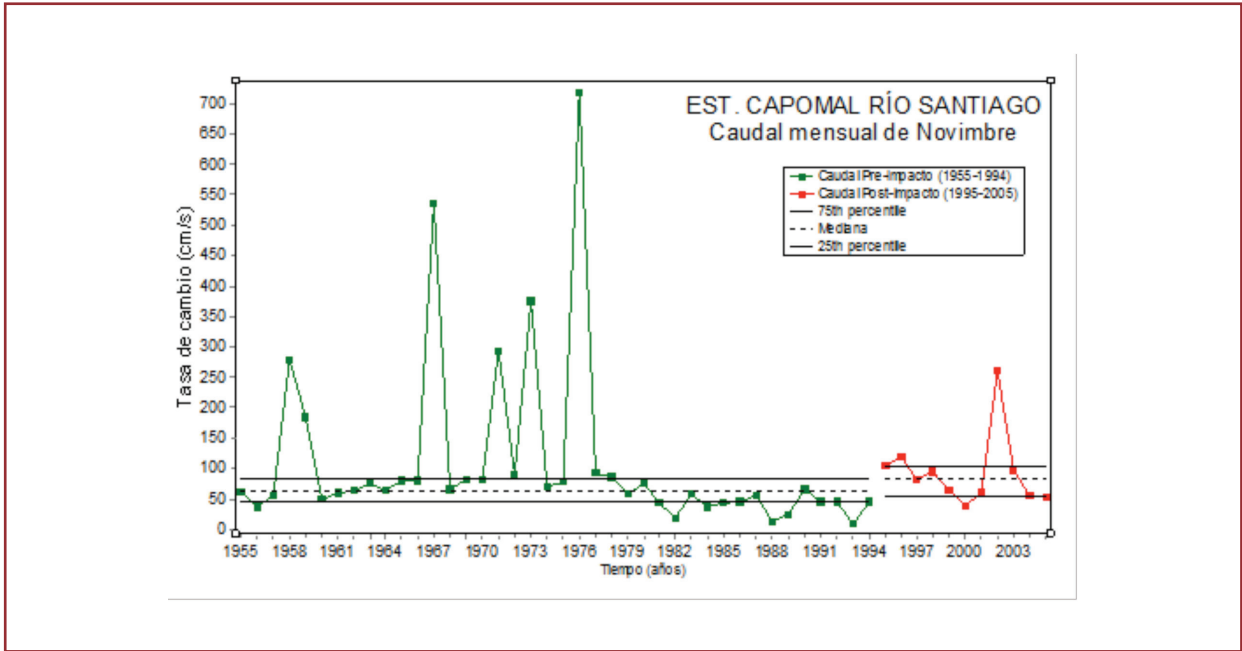


Figura 4.4.3.7.11. Caudal mensual registrado para el mes de *noviembre* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

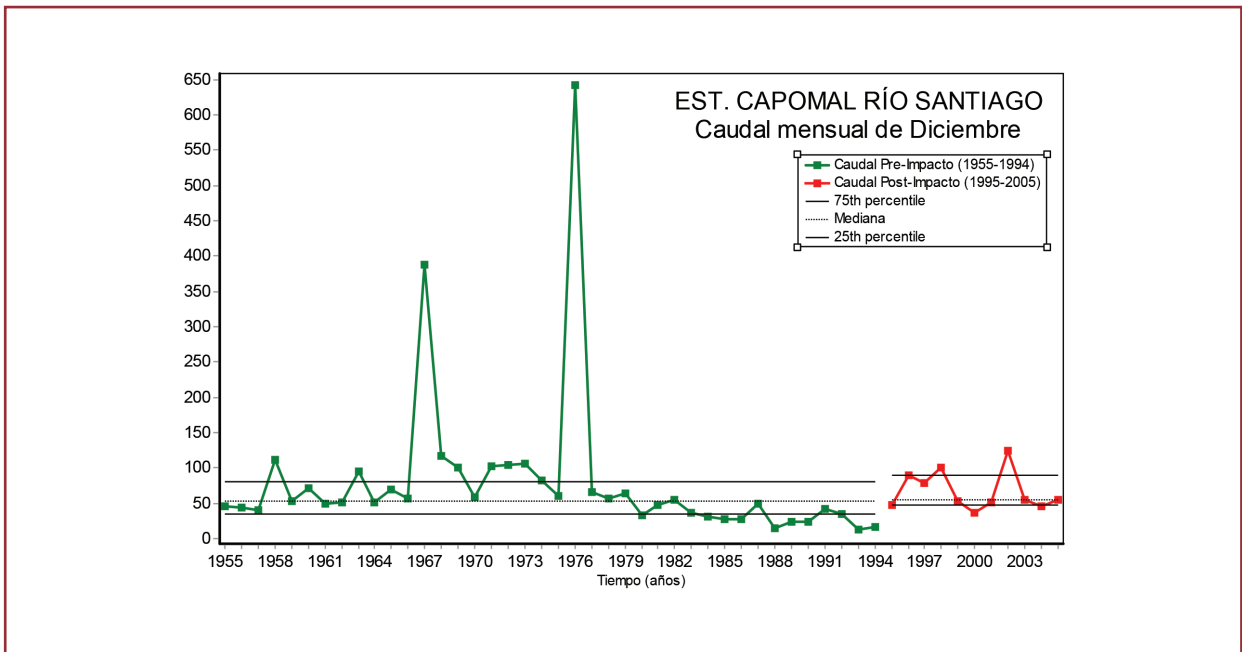


Figura 4.4.3.7.12. Caudal mensual registrado para el mes de *diciembre* en el río Santiago, para el periodo anterior (1955 - 1994) y posterior (1995 - 2005) a la construcción de la presa Aguamilpa.

ANEXO 5

ANÁLISIS DE REGRESIÓN DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL MEDIO MENSUAL

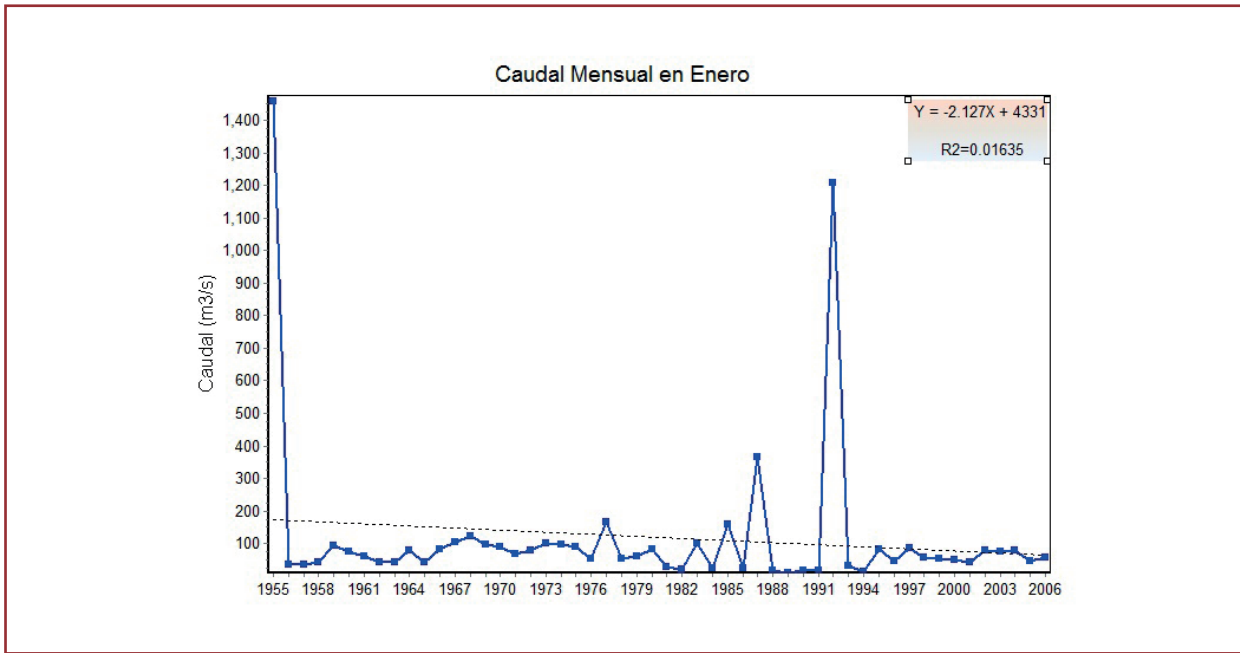


Figura 4.4.3.10.1. Variación del caudal medio mensual para el mes de *enero* en el periodo de estudio.

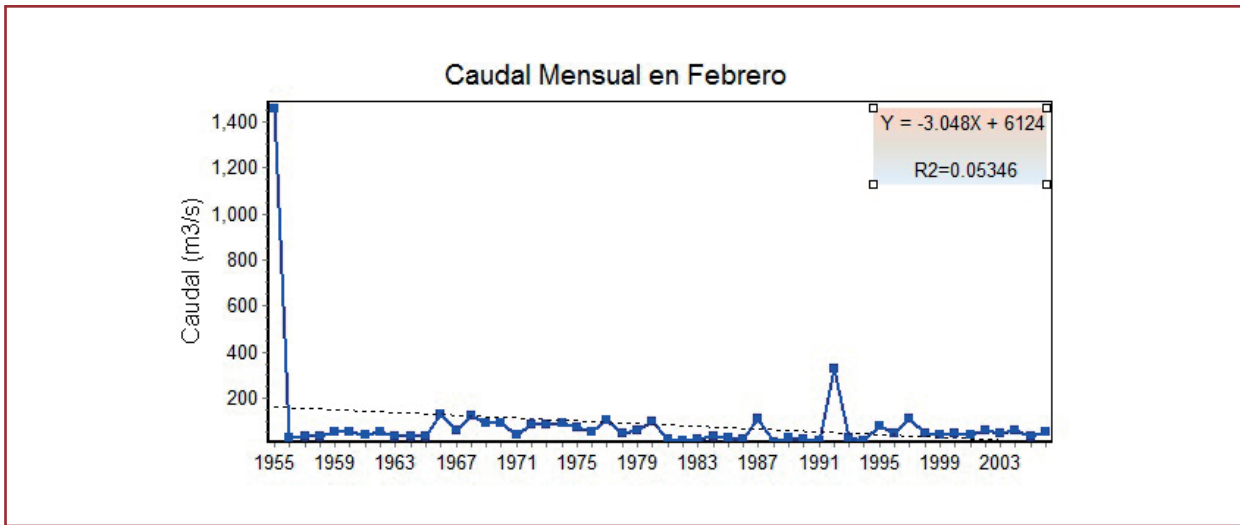


Figura 4.4.3.10.2 Variación del caudal medio mensual para el mes de *febrero* en el periodo de estudio.

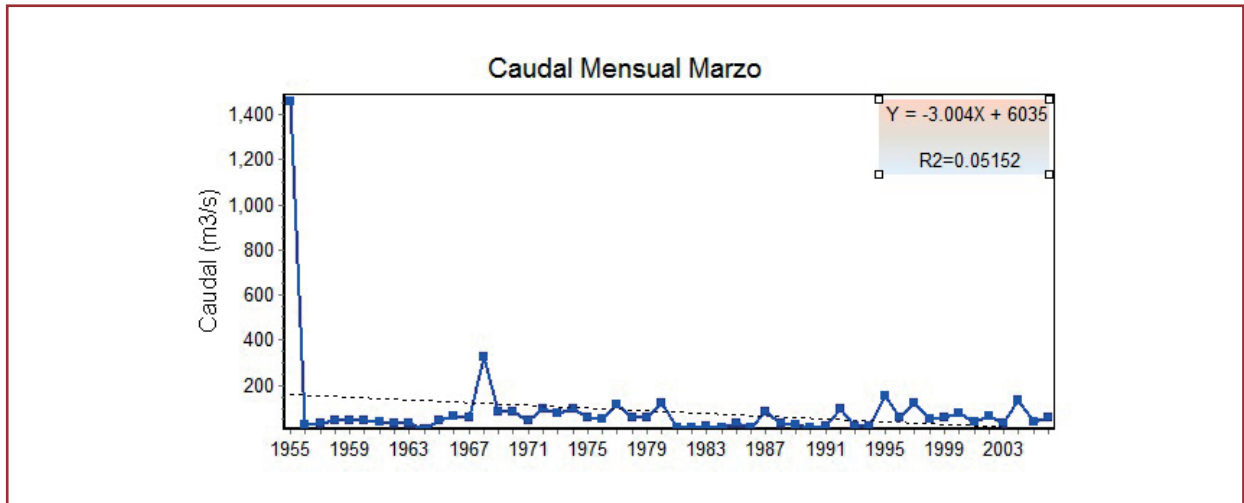


Figura 4.4.3.10.3. Variación del caudal medio mensual para el mes de *marzo* en el periodo de estudio.

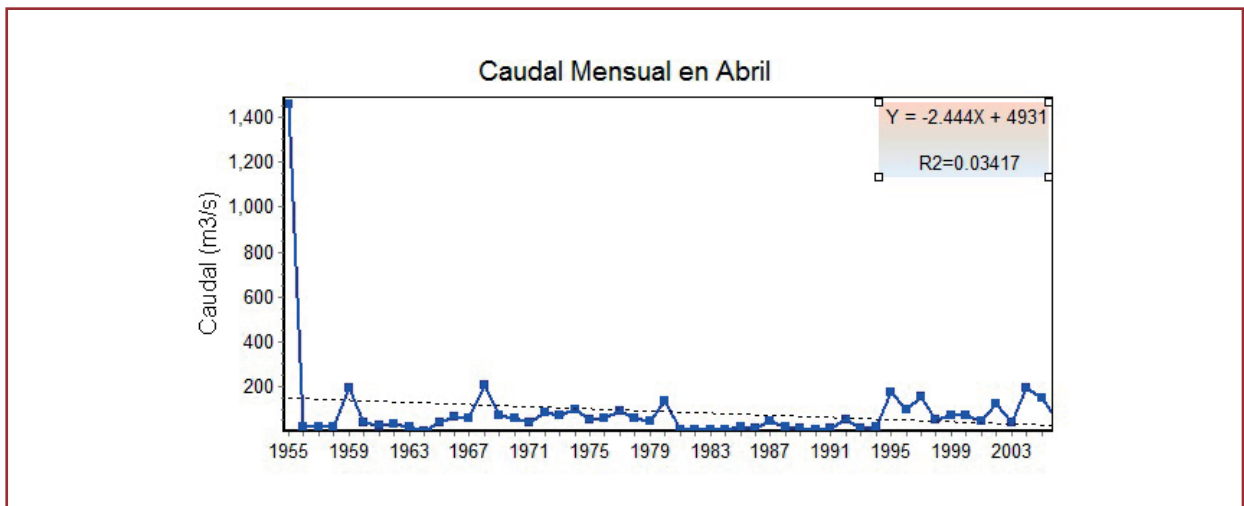


Figura 4.4.3.10.4. Variación del caudal medio mensual para el mes de *abril* en el periodo de estudio.

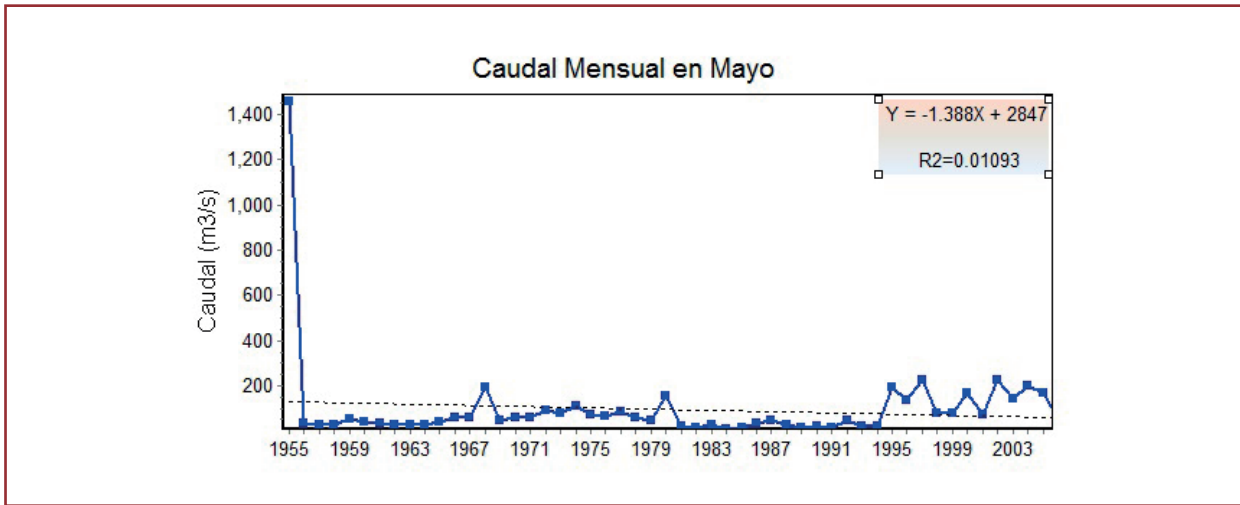


Figura 4.4.3.10.5. Variación del caudal medio mensual para el mes de *mayo* en el periodo de estudio.

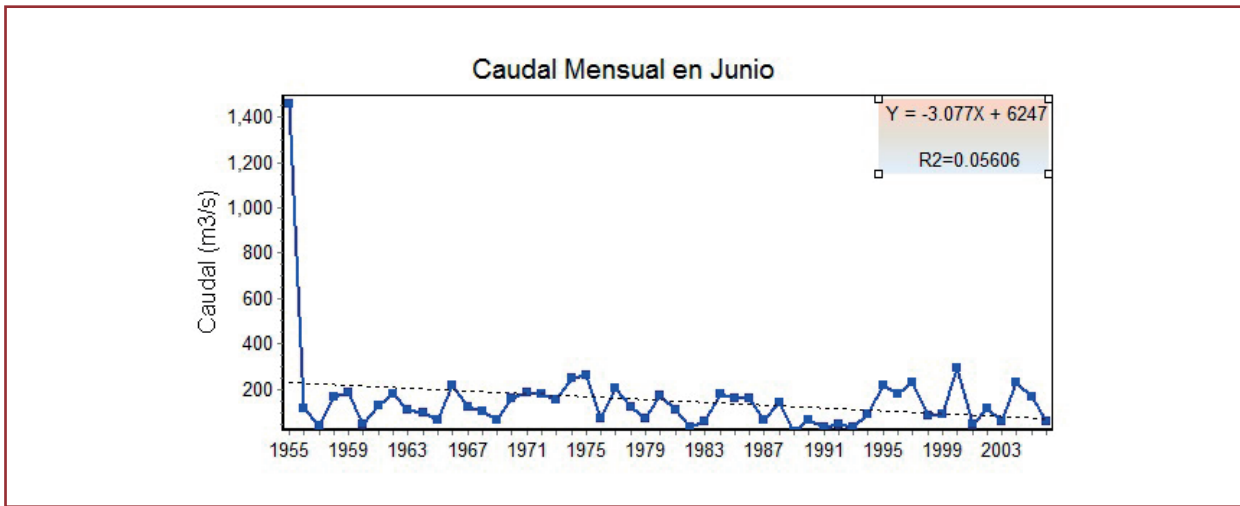


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *junio* en el periodo de estudio.

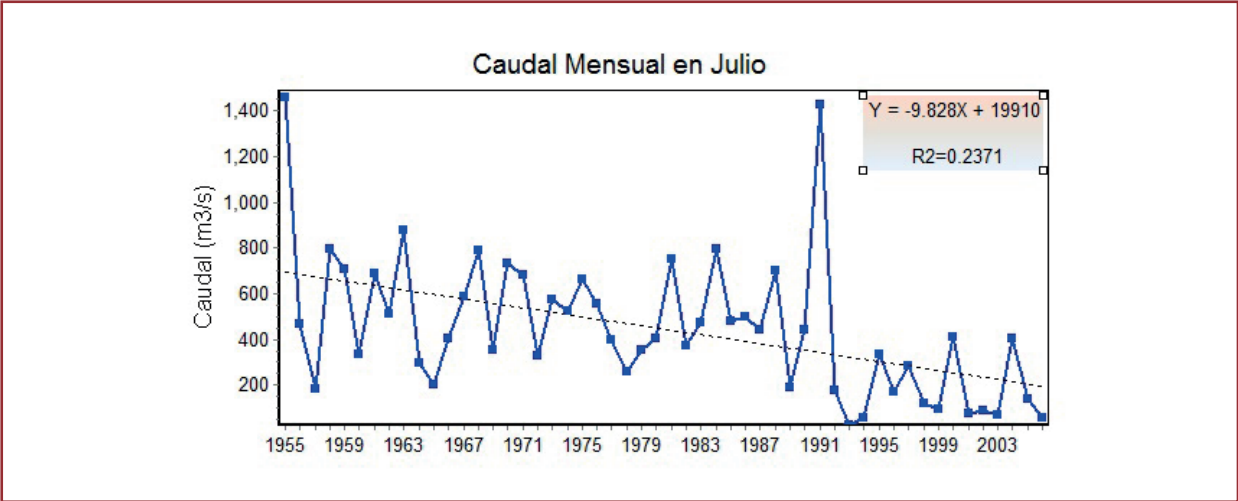


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *julio* en el periodo de estudio.

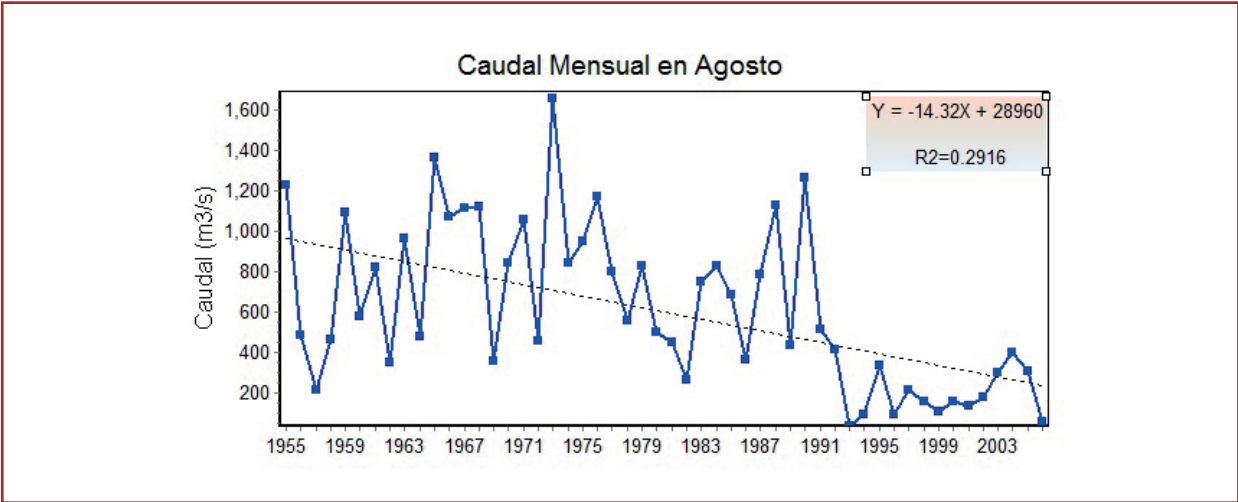


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *agosto* en el periodo de estudio.

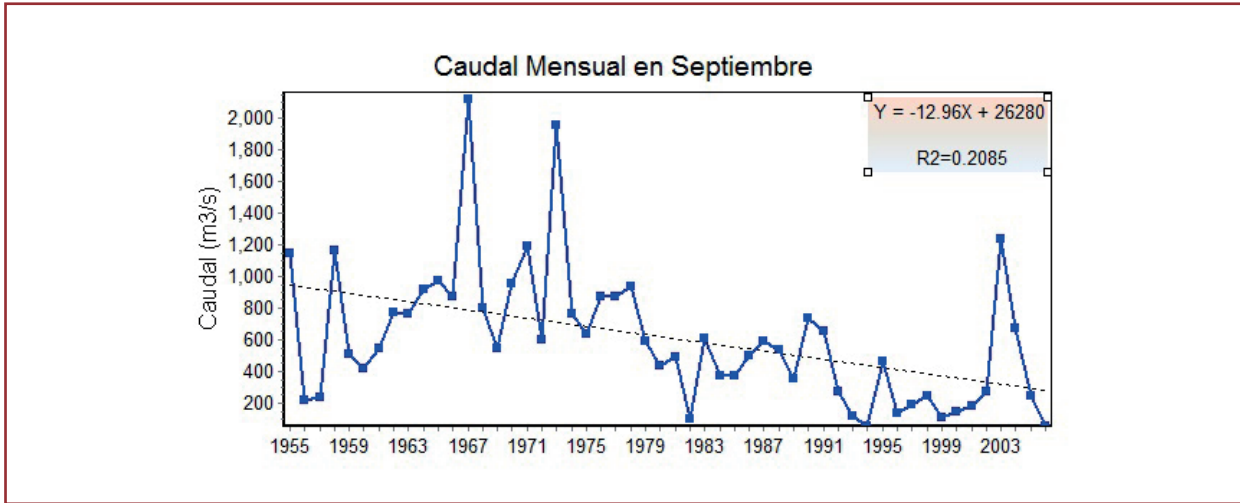


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *septiembre* en el periodo de estudio.

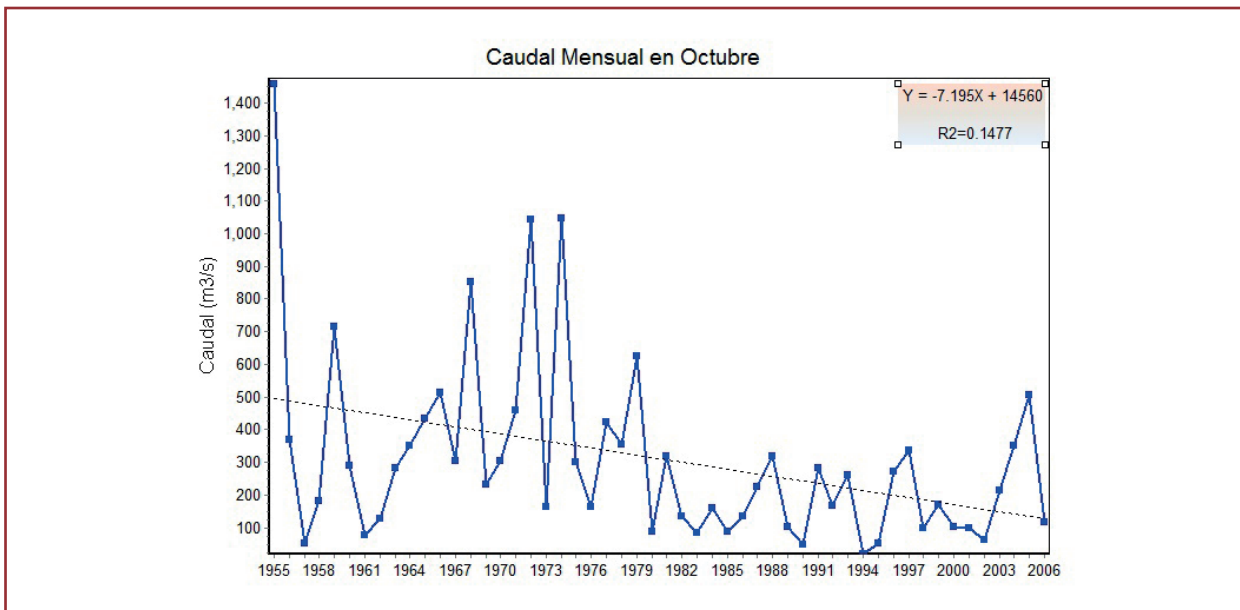


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *octubre* en el periodo de estudio.

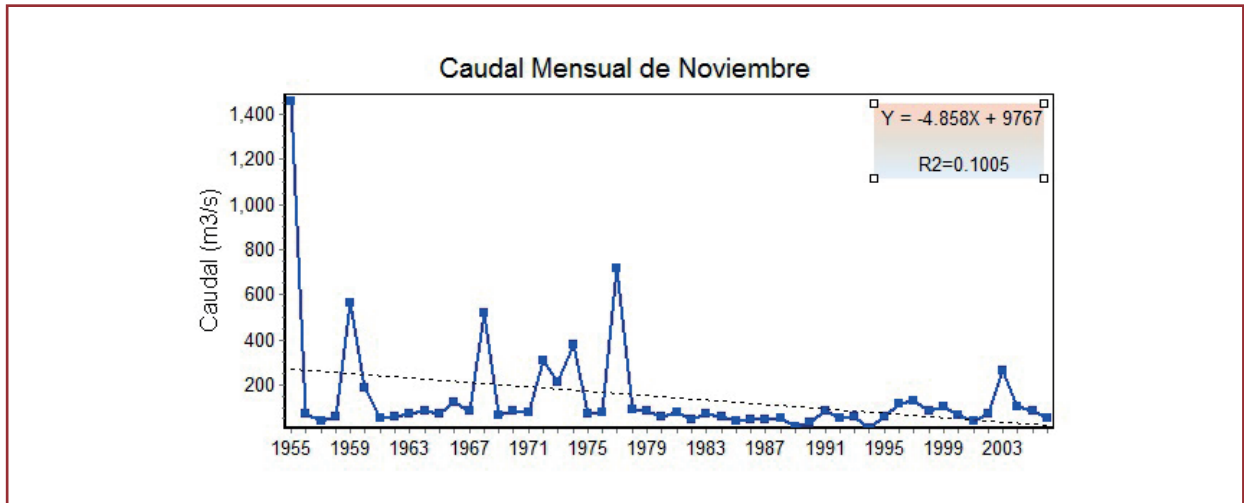


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *noviembre* en el periodo de estudio.

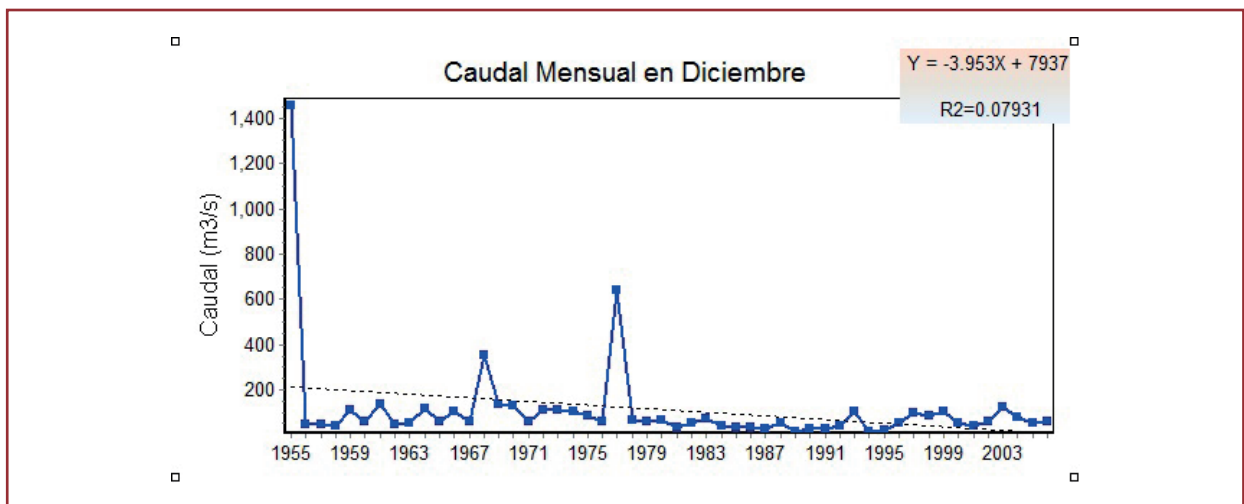


Figura 4.4.3.10.6. Variación del caudal medio mensual para el mes de *diciembre* en el periodo de estudio.

ANEXO 6

ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN LINEAL DE LOS CAUDALES BAJOS EN EL TIEMPO PARA LOS DIFERENTES MESES DEL AÑO

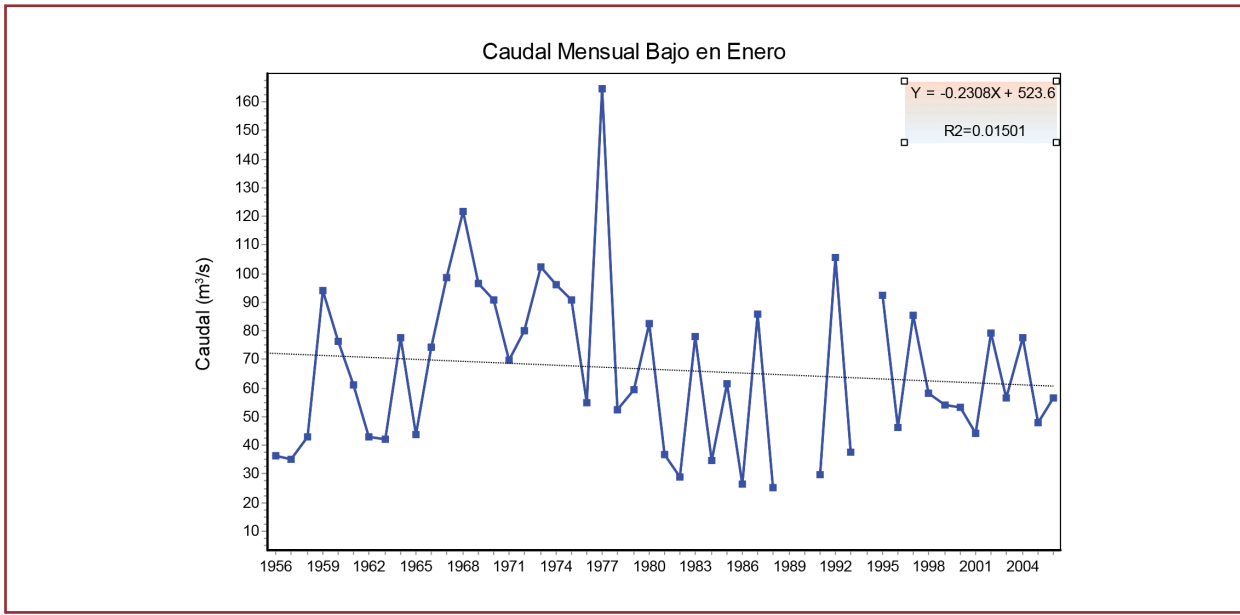


Figura 4.4.3.10.13. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *enero*.

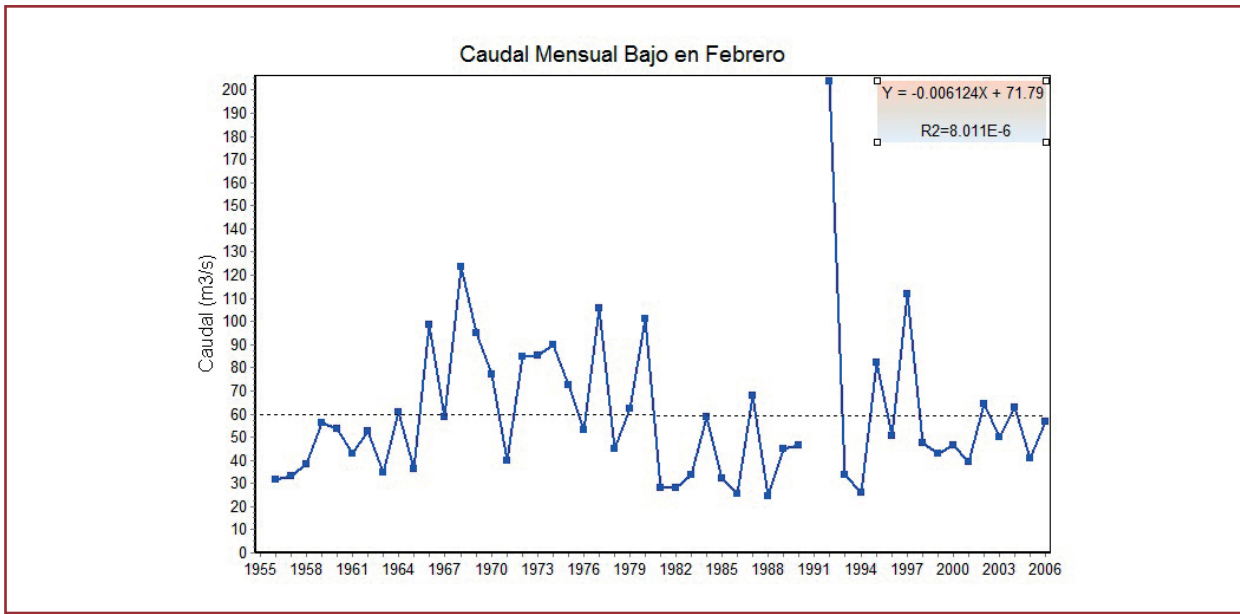


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *febrero*.

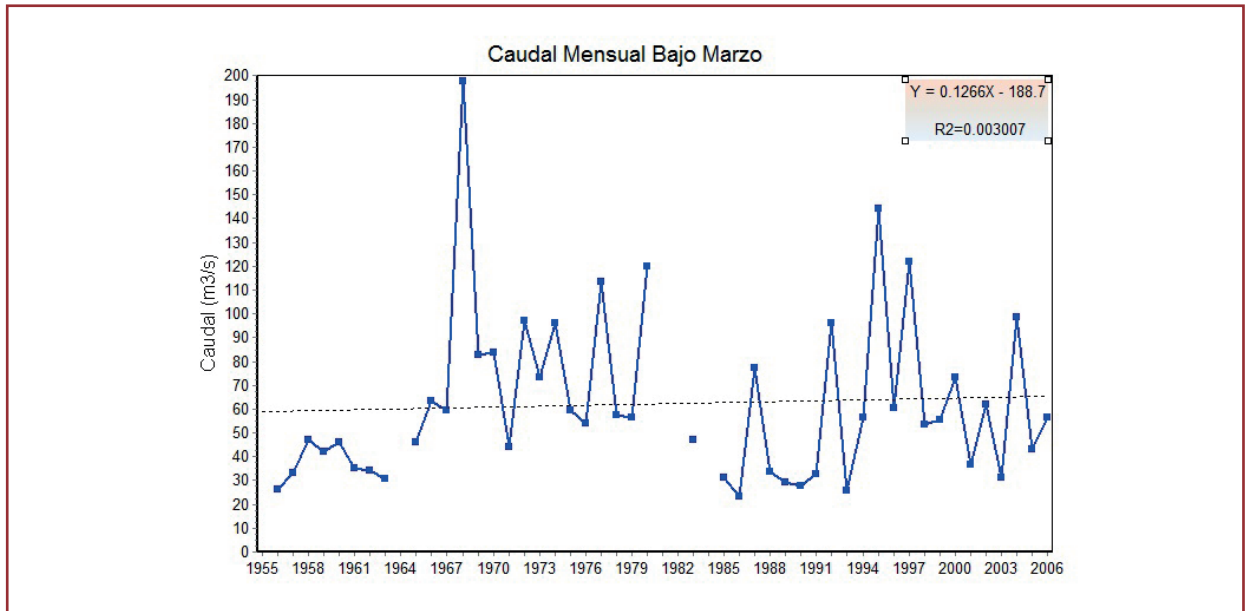


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *marzo*.

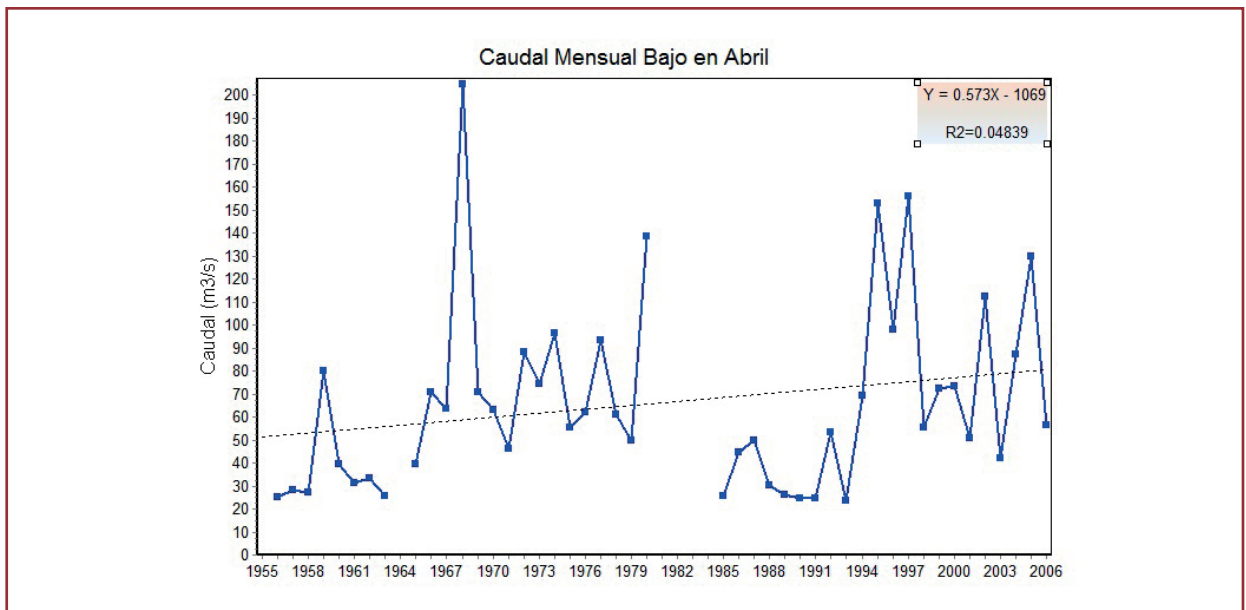


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *abril*.

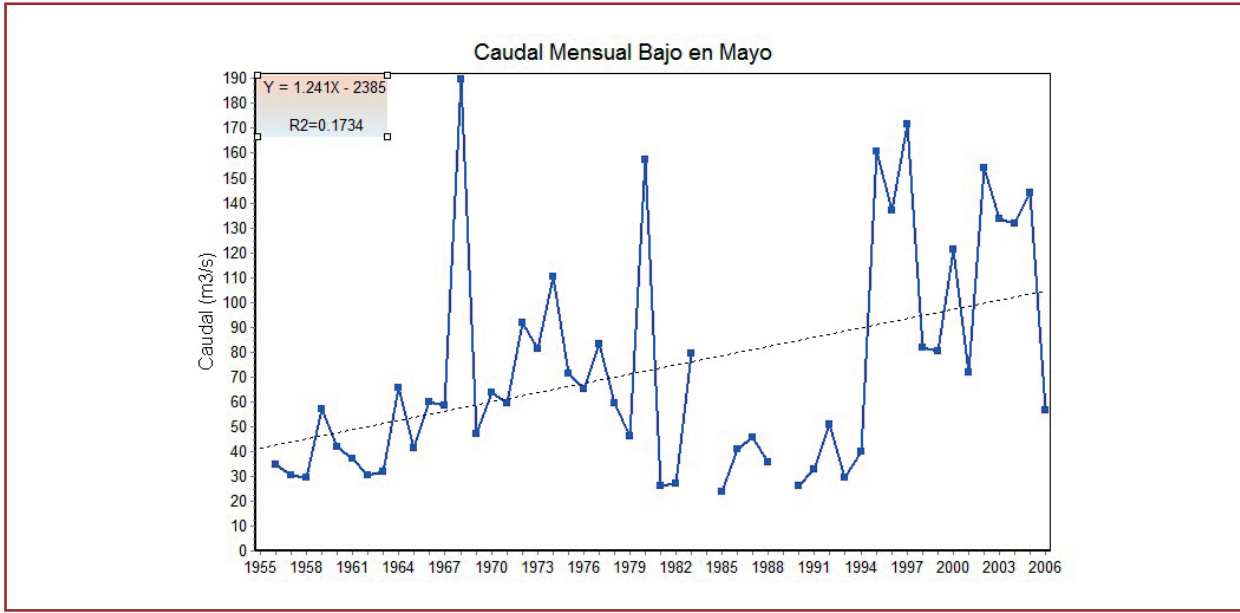


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *mayo*.

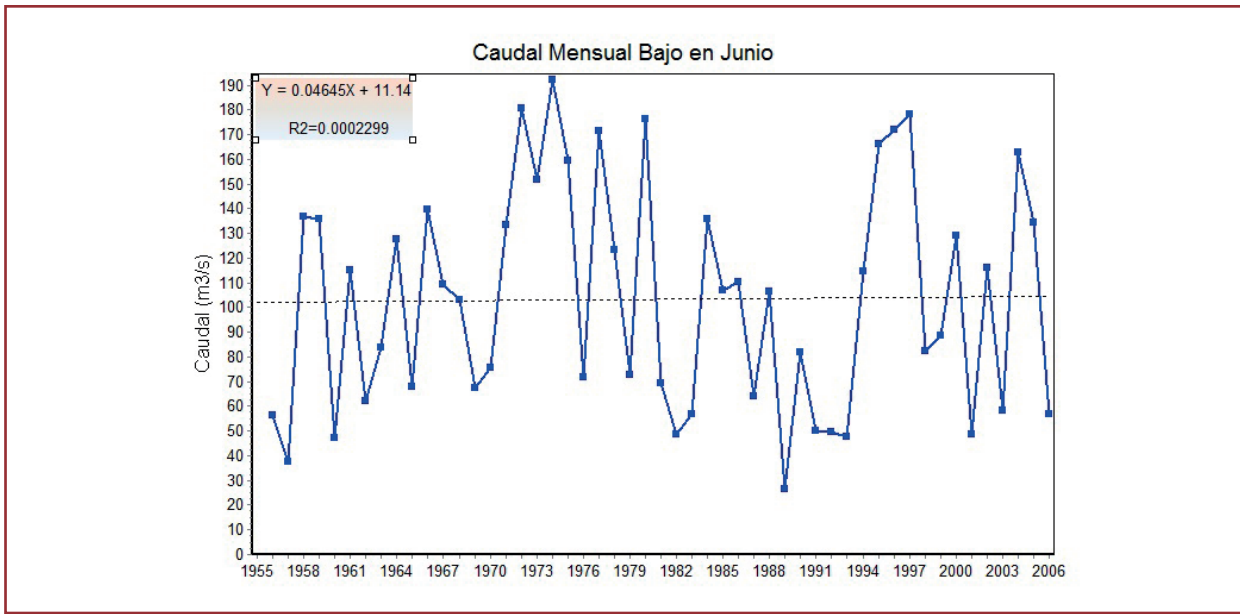


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *junio*.

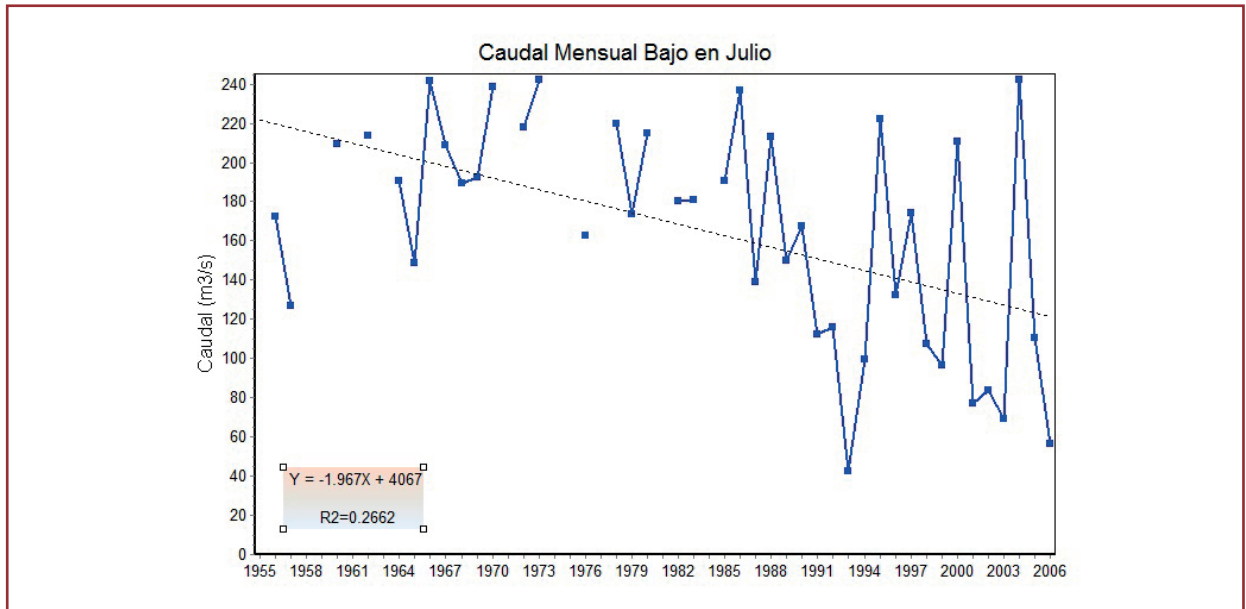


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *julio*.

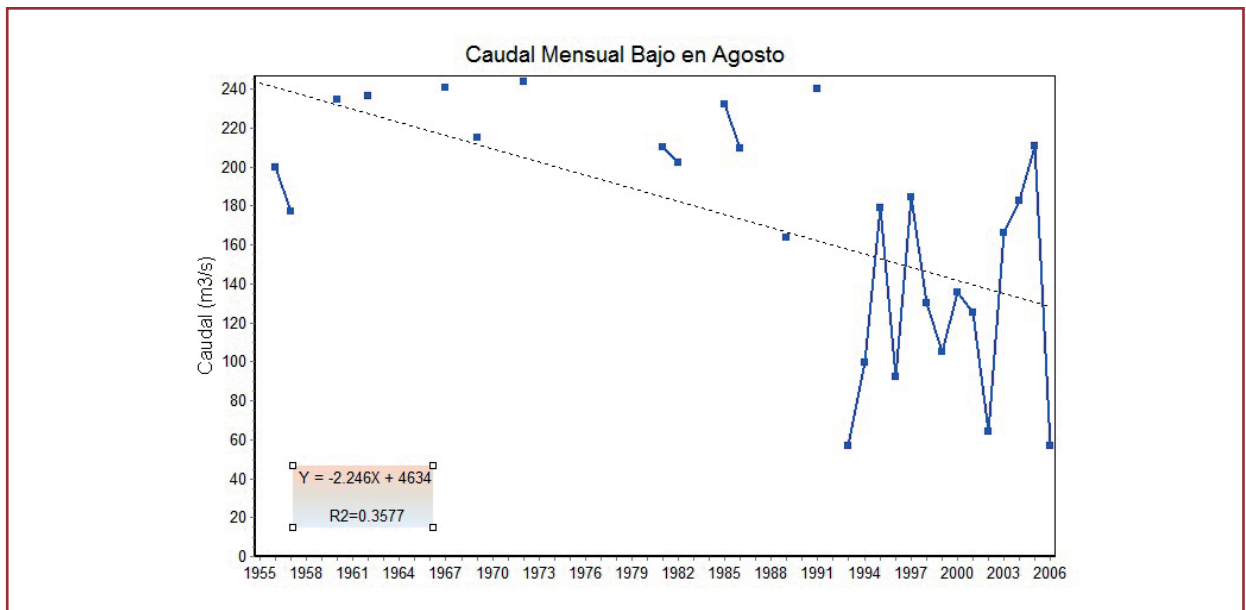


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *agosto*.

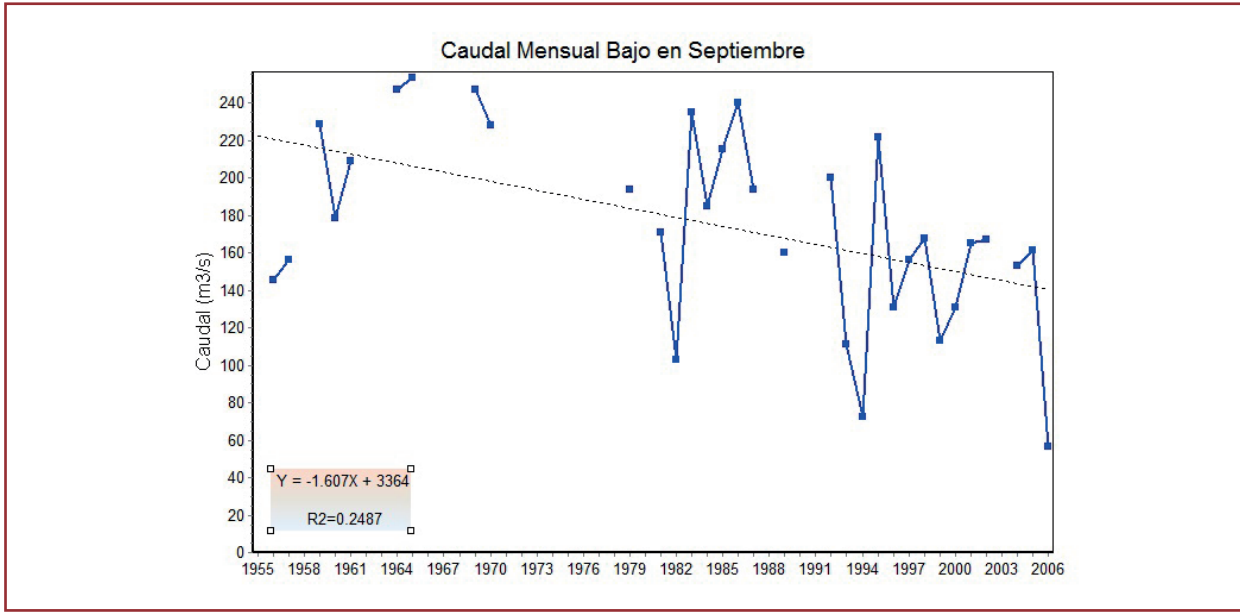


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *septiembre*.

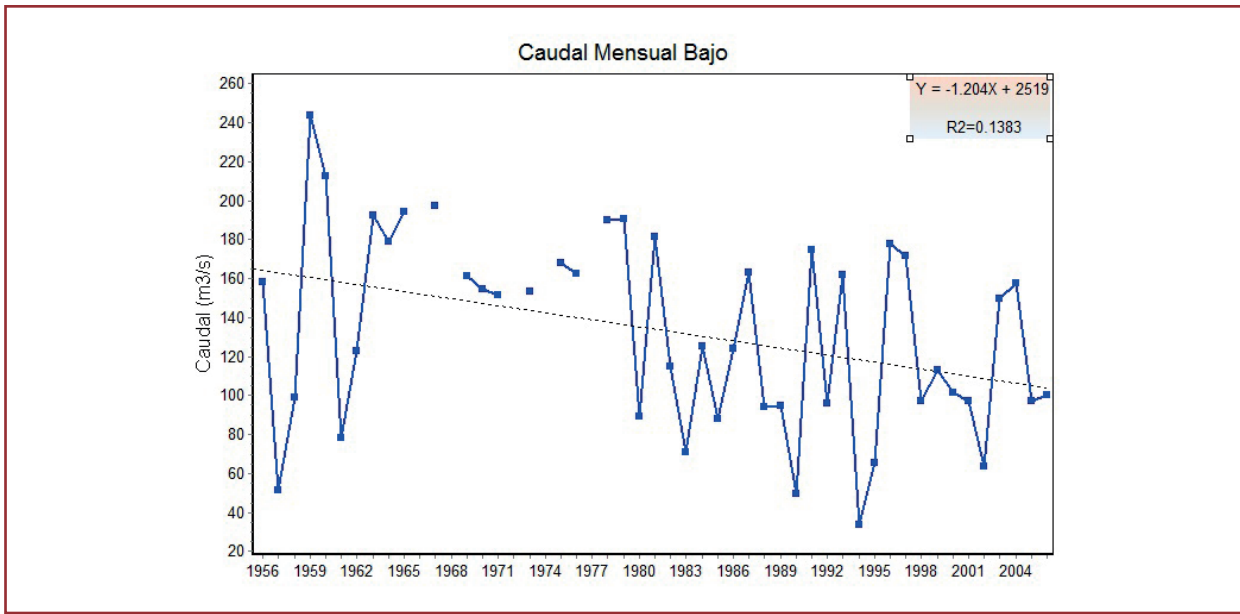


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *octubre*.

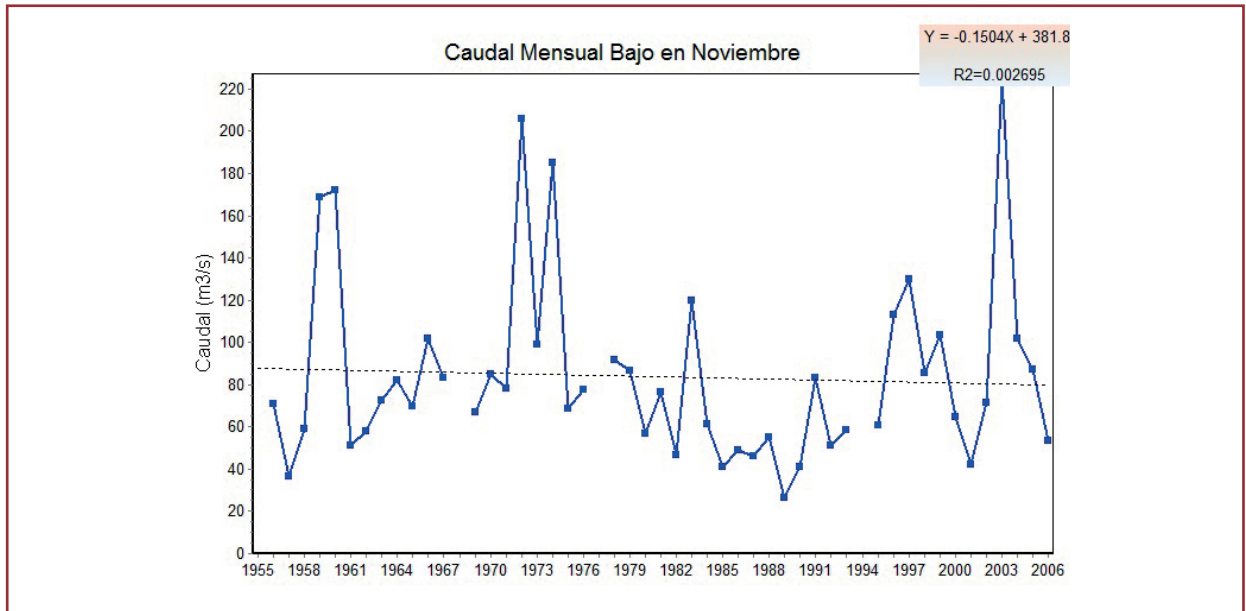


Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *noviembre*.

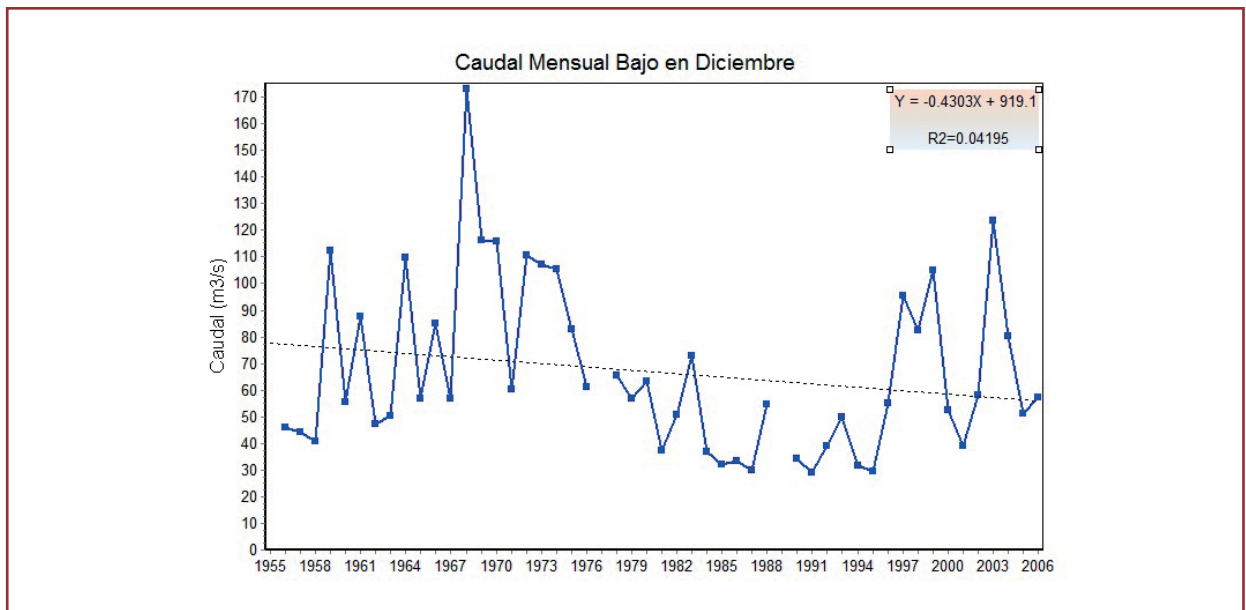
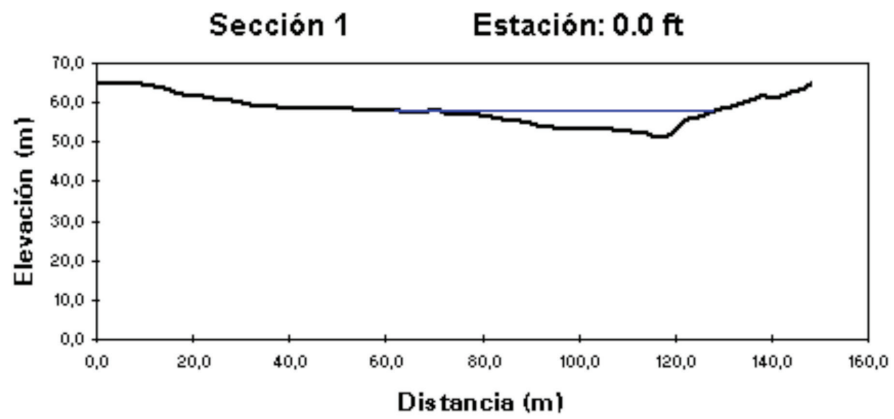
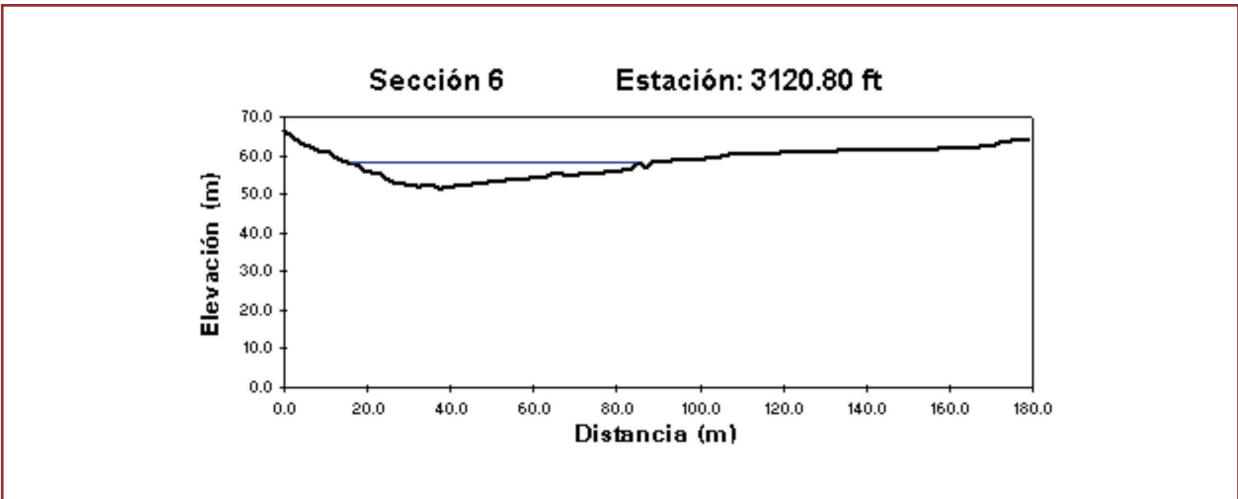
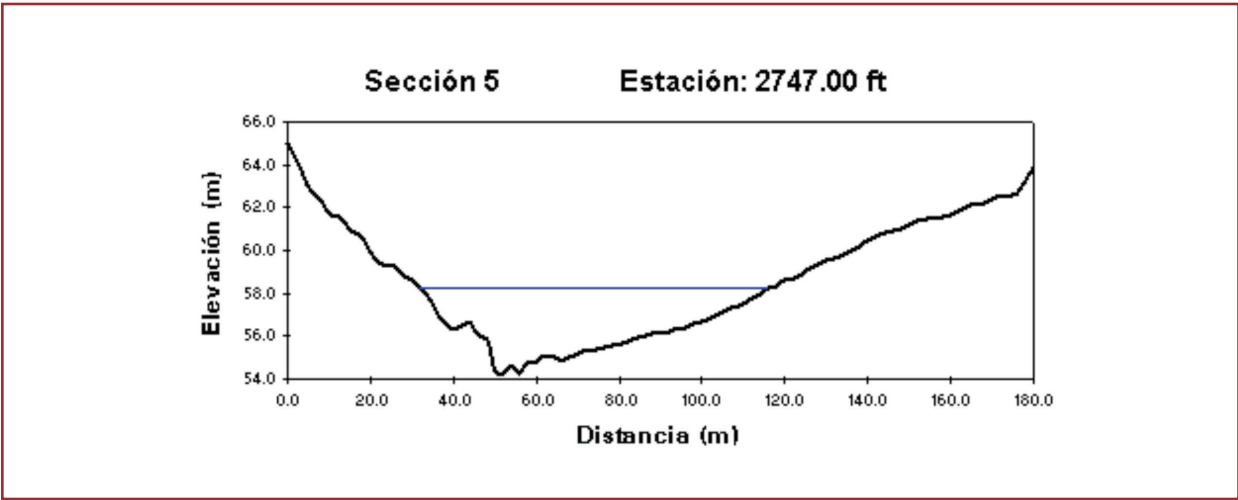
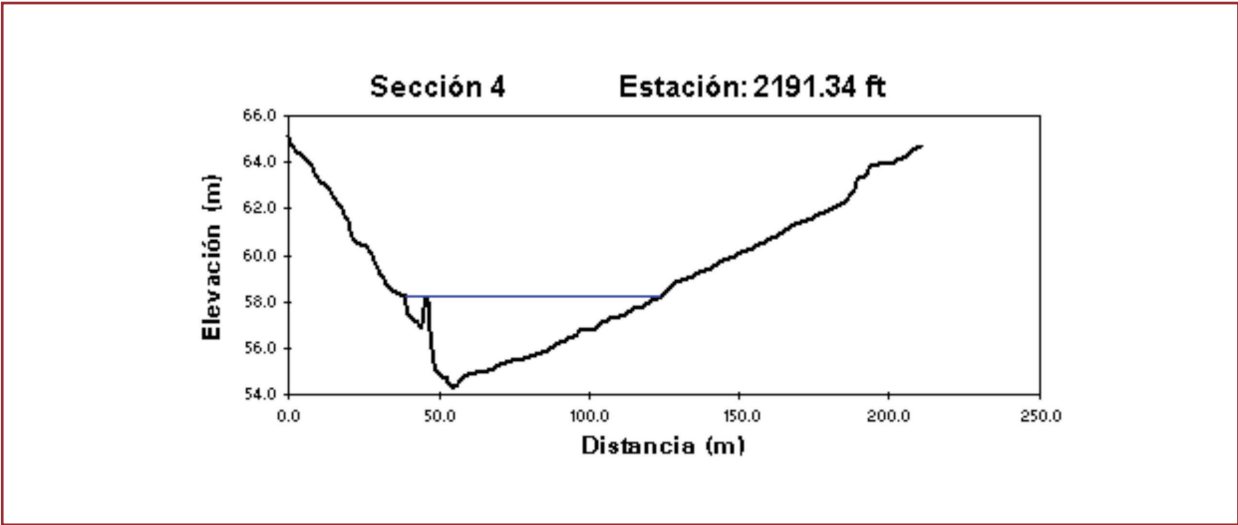


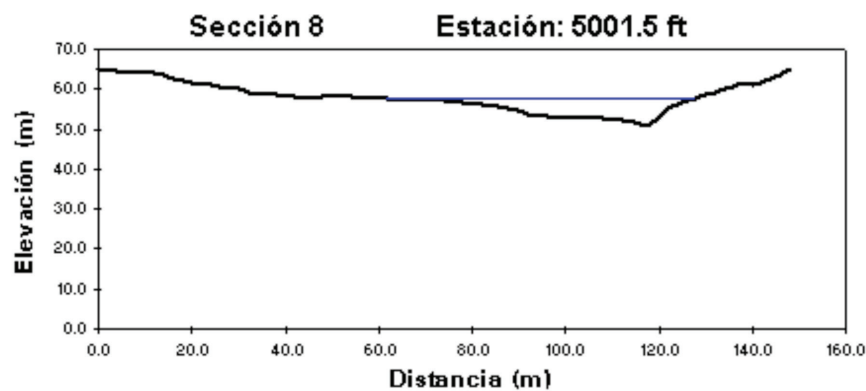
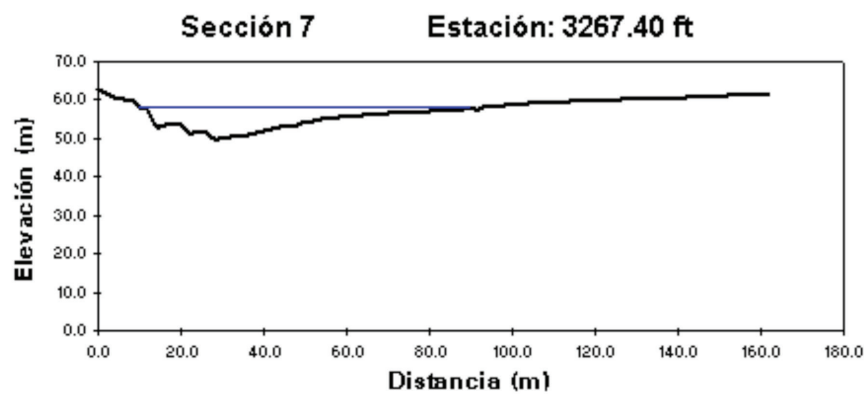
Figura 4.4.3.10.14. Análisis de regresión y correlación lineal de los caudales bajos en el río Santiago, durante el periodo de estudio y para el mes de *diciembre*.

ANEXO 7

BATIMETRÍA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL TRAMO DE ESTUDIO DEL RÍO SANTIAGO







ANEXO 8

INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA E HIDROMÉTRICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL 1

Información topográfica e hidrométrica de la sección transversal 1(García et al, 1999).

Sección transversal 1 de 8 Página 1 de 3 .

Caudales: 1) 3 424.80 pies³/s 2) 3)

Índice de canal para: 1) 6 2) 3)

Estación 0.0 D 0.0 SZF 184.4 pies.

**** Recuerde marcar el punto de máxima profundidad ****

Núm.	Distancia punto de partida (ft) L izq.	Elevación terreno (ft)	Velocidad media (fps) Celda o vertical				Código sustrato/ cobertura Índice de canal		
			1	2	3	4	1	2	3
1	0	195.8							
2	6.56	195.54							
3	13.12	195.64							
4	19.69	195.57							
5	26.25	195.54							
6	32.81	195.51							
7	39.37	195.47							
8	45.93	195.41							
9	52.49	195.37							
10	59.06	195.34							
11	65.62	195.31							
12	72.18	195.24							
13	78.74	195.21							
14	85.3	195.18							
15	91.86	195.11							
16	98.43	195.08							
17	104.99	195.05							
18	111.55	194.98							
19	118.11	194.95							
20	124.67	194.91							
21	131.23	194.88							
22	137.8	194.82							
23	144.36	194.78							

Núm.	Distancia punto de partida (ft) L izq.	Elevación terreno (ft)	Velocidad media (fps) Celda o vertical				Código sustrato/ cobertura Índice de canal		
			1	2	3	4	1	2	3
24	150.92	194.49							
25	157.48	194.26							
26	164.04	194							
27	170.6	193.77							
28	177.17	193.5							
29	183.73	193.27							
30	190.29	193.04							
31	196.85	192.91							
32	203.41	192.81							
33	209.97	192.68							
34	216.54	192.59							
35	223.1	192.45							
36	229.66	192.36							
37	236.22	192.26							
38	242.78	192.13							
39	249.34	192.03							

No.= Número secuencial de los puntos de medición en el sentido transversal.

D= Distancia a la sección inmediata situada aguas abajo.

SZF= Estado de flujo cero (altura del punto en el plano topográfico longitudinal de la sección donde el agua deja de fluir).

Información topográfica e hidrométrica de la sección transversal, página 2 (García et al., 1999).

Sección transversal 1 de 8 Página 2 de 3 .

Caudales: 1) 3 424.80 pies³/s 2) 3)

Índice de canal para: 1) 6 2) 3)

Estación 0.0 D 0.0 SZF 184.4 pies.

**** Recuerde marcar el punto de máxima profundidad ****

Núm.	Distancia punto de partida (ft) L izq.	Elevación terreno (ft)	Velocidad media (fps) Celda o vertical				Código sustrato/ cobertura Índice de canal		
			1	2	3	4	1	2	3
40	255.91	191.93	0						
41	262.47	191.8	0.591						
42	269.03	191.7	0.686						
43	275.59	191.57	0.781						
44	282.15	191.47	1.001						
45	288.71	191.34	1.27						
46	295.28	191.24	1.253						
47	301.84	191.08	1.552						
48	308.4	191.04	1.923						
49	314.96	190.98	1.962						
50	321.52	190.88	2.595						
51	328.08	190.78	2.707						
52	334.65	190.68	2.854						
53	341.21	190.62	3.264						
54	347.77	190.52	3.786						
55	354.33	190.42	3.973						
56	360.89	190.35	4.419						
57	367.45	190.26	4.829						
58	374.02	190.16							
59	380.58	190.09							
60	387.14	190							
61	393.7	189.7							
62	400.26	189.4							

Núm.	Distancia punto de partida (ft) L izq.	Elevación terreno (ft)	Velocidad media (fps) Celda o vertical				Código sustrato/ cobertura Índice de canal		
			1	2	3	4	1	2	3
63	406.82	189.14							
64	413.39	188.88							
65	419.95	188.52							
66	426.51	188.39							
67	433.07	188.19							
68	439.63	187.76							
69	446.19	187.4							
70	452.76	187.3							
71	459.32	187.3							
72	465.88	186.91							
73	472.44	186.65							
74	479	186.02							
75	485.56	185.73							
76	492.13	185.66							
77	498.69	185.07							
78	505.25	184.71							

No.= Número secuencial de los puntos de medición en el sentido transversal.

D= Distancia a la sección inmediata situada aguas abajo.

SZF= Estado de flujo cero (altura del punto en el plano topográfico longitudinal de la sección donde el agua deja de fluir).

Información topográfica e hidrométrica de la sección transversal, página 3 (García et al., 1999).

Sección transversal 1 de 8 Página 3 de 3 .

Caudales: 1) 3 424.80 pies³/s 2) 3)

Índice de canal para: 1) 6 2) 3)

Estación 0.0 D 0.0 SZF 184.4 pies.

**** Recuerde marcar el punto de máxima profundidad ****

Núm.	Distancia punto de partida (ft) L izq.	Elevación terreno (ft)	Velocidad media (fps) Celda o vertical				Código sustrato/ cobertura Índice de canal		
			1	2	3	4	1	2	3
79	511.81	184.68	5.502						
80	518.37	184.51	6.768						
81	524.93	184.68	6.719						
82	531.5	184.48	6.768						
83	538.06	184.51	7.198						
84	544.62	184.51	7.513						
85	551.18	184.42**	8.258						
86	557.74	185.07	7.178						
87	564.3	184.94	7.513						
88	570.87	185.5	4.98						
89	577.43	185.76	3.786						
90	583.99	186.12	1.552						
91	590.55	190	0						
92	597.11	193.27							
93	603.67	196.56							
94	610.24	199.84							
95	616.8	203.12							
96	623.36	206.4							
97	629.92	209.68							

Núm.	Distancia punto de partida (ft) L izq.	Elevación terreno (ft)	Velocidad media (fps) Celda o vertical				Código sustrato/ cobertura Índice de canal		
			1	2	3	4	1	2	3
98	636.48	212.96							
99	643.04	216.24							

No. = Número secuencial de los puntos de medición en el sentido transversal.

D = Distancia a la sección inmediata situada aguas abajo.

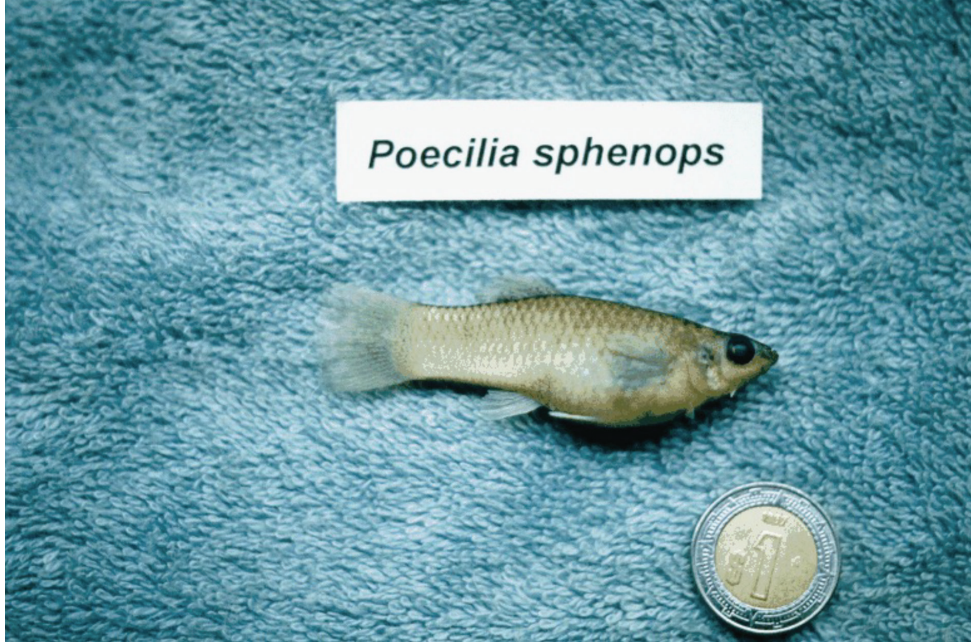
SZF = Estado de flujo cero (altura del punto en el plano topográfico longitudinal de la sección donde el agua deja de fluir).

ANEXO 9

FOTOGRAFÍAS DE LAS ESPECIES ÍCTICAS DEL RÍO SANTIAGO, NAYARIT



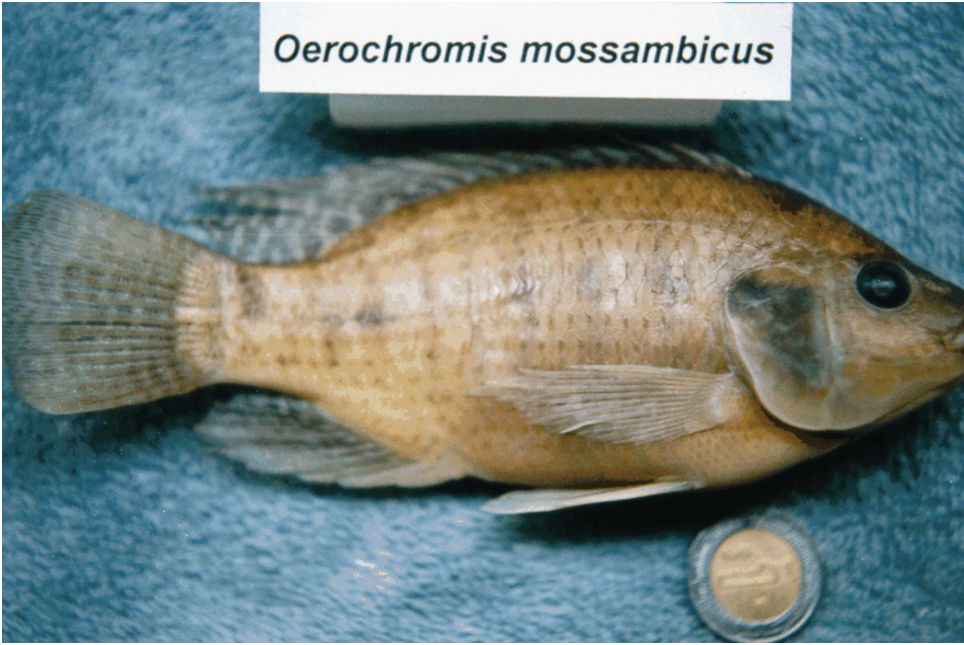
Poecilia sphenops



Lile stolifera



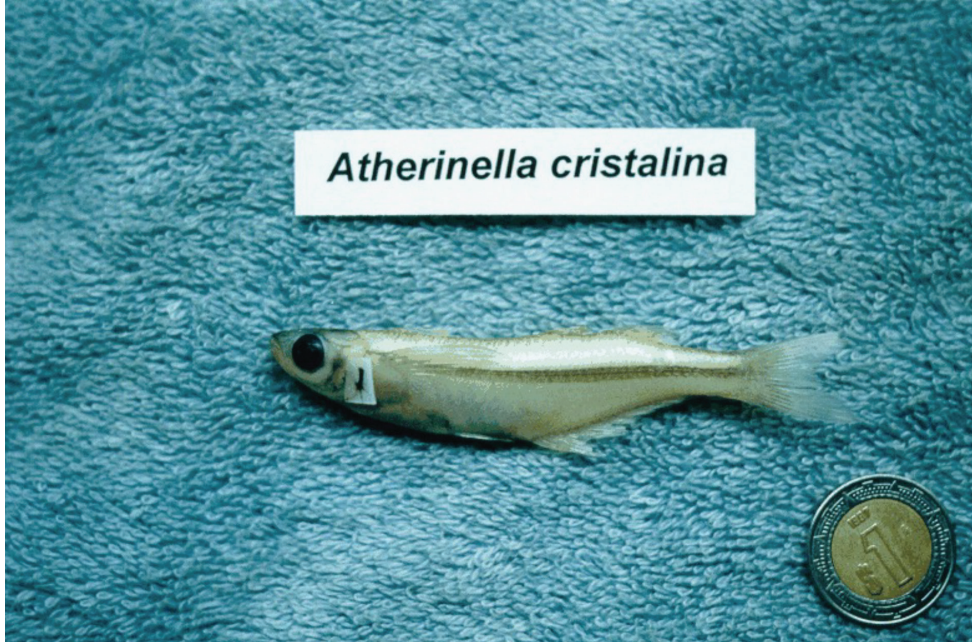
Oerochromis mossambicus



Micropterus salmoides



Atherinella cristalina



Awaous tajasica



Agonostomus monticola



Dorosoma smithii

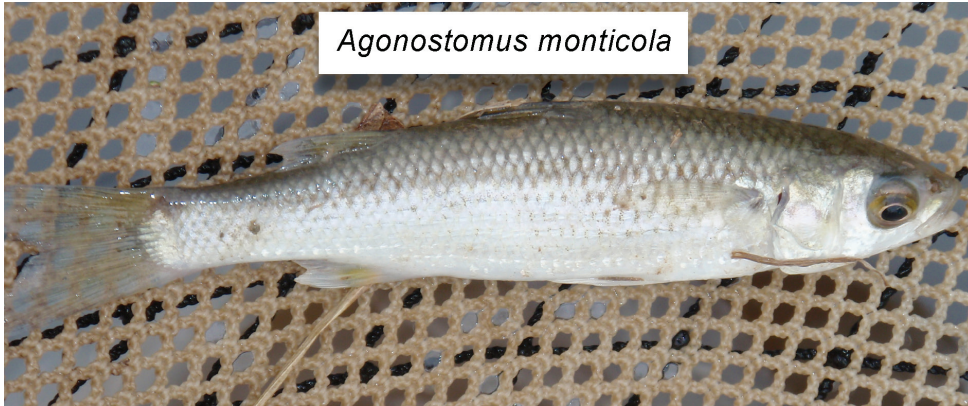


ANEXO 10

FOTOGRAFÍAS DE LAS ESPECIES ÍCTICAS DEL RÍO VERDE, OAXACA









IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES

