



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Cuenca del río Culiacán: Evaluación
ambiental y análisis del régimen del
flujo por la construcción de grandes
presas**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Ilse Rosas Lindero

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis Aragón Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024





Este trabajo (Tesis de Licenciatura No. 15) fue desarrollado dentro del Grupo de Enseñanza e Investigación en Ingeniería y Ciencias del Agua (GEIICA). Además, se han dirigido 3 tesis de Especialización y 6 de Maestría.

GEIICA está formado por estudiantes de Servicio Social, tesistas de Licenciatura, Especialidad, Maestría y Doctorado y profesores-investigadores del Departamento de Hidráulica, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, quienes comparten el gusto por la enseñanza en las asignaturas que imparten a nivel Licenciatura y Posgrado, la práctica profesional para solventar problemáticas de la mejor manera, desarrollar e impulsar la investigación en el área de la ingeniería y ciencias del agua.







Resumen

El desarrollo del país ha dependido en gran medida de la infraestructura hidráulica para resolver los problemas hídricos. La construcción de grandes presas ha tenido grandes beneficios, como la generación de energía eléctrica y el abastecimiento de agua potable. También ha ocasionado consecuencias negativas, como el impacto social y ambiental. Esta problemática se debe a la falta de planificación adecuada para gestionar las cuencas y medidas para disminuir las amenazas al recurso hídrico y la biodiversidad existente.

La presente tesis, tiene como objetivo aplicar métodos ecohidrológicos para conocer el grado de conservación ambiental en la cuenca del Río Culiacán y analizar los cambios en el régimen de flujo causados por la operación de dos grandes presas.

En primer lugar, se evaluó la condición de conservación de la cuenca con la metodología propuesta por Cantú et al. (2018). Este análisis se llevó a cabo mediante la revisión de 46 variables ambientales para determinar 4 índices. Estos índices identifican los sitios con instrumentos políticos adecuados para una gestión eficiente, los sitios propuestos que se consideran importantes, el impacto ambiental, y el índice de conservación, el cual sintetiza el estado en el que se encuentran las subcuencas.

Después, se utilizó la norma mexicana de caudales ecológicos, en específico, el apéndice B, para identificar si el régimen hidrológico de la cuenca se encuentra alterado por la construcción de grandes presas. Posteriormente, se aplicó el método de alteración hidrológica de Richter (1996; 1997; 1998), basado en el análisis de 64 variables hidrológicas, comparando el periodo antes y después de la construcción de las presas. Finalmente, se establecieron objetivos preliminares para la gestión del flujo utilizando el método de análisis de variabilidad de régimen (RVA).

Los resultados muestran que la cuenca del Río Culiacán carece de instrumentos reconocidos para mitigar el significativo impacto ambiental presente. La cuenca está fuertemente alterada debido a la construcción de las grandes presas, especialmente en el río Humaya. Se ha observado un cambio en el régimen hidrológico y una gestión inadecuada de la cuenca.

PALABRAS CLAVES: Conservación ambiental, Indicadores de alteración hidrológica, Análisis de variabilidad de régimen





Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte importante en mi vida y en este gran logro.

A Mitzi A. y Zaid A., por ser mis más grandes compañeros y darme ánimos todos los días, su apoyo ha sido invaluable.

A mis padres, porque han sido la pieza fundamental para alcanzar mis sueños. Mi más profundo agradecimiento a Arturo Rosas porque me ha enseñado a ser mejor persona todos los días, por enseñarme a ser resiliente. Es un verdadero orgullo tener un papá como él; sin duda los mejores consejos que he recibido a lo largo de mi vida han sido suyos. A Alma Lindero por llevarme hasta aquí y siempre confiar en mis sueños, por sus palabras de aliento y su constante apoyo, es mi más grande ejemplo de perseverancia. No me alcanzaría la vida para agradecerles por todo.

A mi director de tesis, Dr. José Luis Aragón porque a lo largo de este proceso he aprendido mucho y por supuesto, por su paciencia. Gracias por su dedicación y por permitirme ser parte del grupo de investigación.

A mis profesores y sinodales M. I. Sixta Mendoza, M. I. Alejandro Maya, Ing. Heriberto Esquivel y M. I. Rodrigo Takashi Sepúlveda por aceptar ser parte de este proceso.

Al grupo GEIICA por ser un pilar fundamental en el desarrollo de mi tesis y por su constante apoyo.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IG100421 “Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable”. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.





“Sólo cuando el último árbol esté muerto,
el último río envenenado y el último pez
atrapado, te darás cuenta de que no puedes
comer dinero”

Sabiduría Indoamericana





Contenido

Introducción.....	15
Planteamiento del problema.....	15
Justificación	16
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos.....	16
Descripción del trabajo.....	16
I. Marco teórico.....	19
1.1. Antecedentes	19
1.2. Conceptos hidrológicos.....	20
1.3. Caracterización ambiental de una cuenca	22
1.4. Alteración ecohidrológica.....	31
1.5. Series de tiempo.....	33
1.5.1 Análisis de tendencias	34
1.6. Caudal ecológico.....	36
1.7. Evaluación del cambio en el régimen de flujo.....	39
1.8. Consecuencias de la alteración ambiental y del régimen de flujo.....	42
II. Zona de estudio: Cuenca del Río Culiacán	47
2.1. Localización.....	47
2.2. Características generales.....	49
2.2.1. Aspectos climatológicos	50
2.2.2. Tipo de suelo	52
2.2.3. Uso de suelo y vegetación	53
2.2.4. Zonas de importancia ecológica	54
2.2.5. Infraestructura hidráulica.....	59
2.2.6. Usos y disponibilidad del agua	62
2.3. Estaciones hidrométricas.....	65
III. Caracterización y evaluación de la cuenca.....	69
3.1. Análisis ambiental de la cuenca	69



3.1.1.	Índice de Sitios con Declaratoria Oficial.....	70
3.1.2.	Índice de Sitios Prioritarios Propuestos.....	72
3.1.3.	Índice de Impacto Ambiental.....	73
3.1.4.	Índice del Grado de Conservación.....	74
3.2.	Series de tiempo de caudales.....	74
3.3.	Caracterización de caudales.....	75
3.3.1.	Tendencias.....	77
3.3.2.	Caudal ecológico.....	78
3.3.3.	Análisis del régimen del flujo.....	81
3.3.4.	Evaluación de la gestión del agua disponible.....	83
3.4.	Análisis de resultados.....	85
IV.	Conclusiones.....	101
V.	Referencias.....	103
VI.	Anexos.....	107



Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Componentes naturales e interacciones de una cuenca hidrográfica (Zuri, 2004).....	21
Ilustración 2 Ciclo del agua (USGS, 2019).....	21
Ilustración 3 Áreas Naturales Protegidas (SEMARNAT, 2023)	24
Ilustración 4 Sitios RAMSAR (CONANP, 2023).....	25
Ilustración 5 Unidades para la conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre (SEMARNAT, 2023)	25
Ilustración 6 Regiones hidrológicas prioritarias (SEMARNAT, 2023)	26
Ilustración 7 Hexágonos terrestres (SEMARNAT, 2023).....	27
Ilustración 8 Regiones Terrestres Prioritarias (SEMARNAT, 2023).....	27
Ilustración 9 Sitios de atención prioritaria extrema, alta y media para la conservación (SEMARNAT, 2023)	28
Ilustración 10 Áreas de importancia para la conservación de aves (SEMARNAT, 2023)	28
Ilustración 11 Alteración en los ríos provocadas por intervenciones antrópicas (izq.) y restauración del río (der.) (IMTA, 2020)	32
Ilustración 12 Clasificación y algunos ejemplos de metodologías para el cálculo de caudales ecológicos (Morales, 2023)	37
Ilustración 13 Indicadores de alteración hidrológica	40
Ilustración 14 Presa Valle de Bravo en su nivel más bajo (Agua.org.mx).....	43
Ilustración 15 Presa Valle de Calderón, Jalisco. 16 de abril 2020 (izq.) y 21 de abril 2021 (der.) (Planet Labs, 2021).....	44
Ilustración 16 La temperatura, factor ambiental que afecta a la fauna acuática (ideas marinas, 2020).....	44
Ilustración 17 Invasión de pez diablo en la presa Don Martín (Conanp, 2020)	45
Ilustración 18 Delimitación geográfica del Golfo de California (Morales, 2023)	47
Ilustración 19 Localización de la cuenca del Río Culiacán	48
Ilustración 20 Delimitación geopolítica en la cuenca del Río Culiacán	49
Ilustración 21 Topografía de la cuenca del río Culiacán (INEGI)	50
Ilustración 22 Climas en la cuenca del Río Culiacán	51
Ilustración 23 Edafología en la cuenca del Río Culiacán	53
Ilustración 24 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del Río Culiacán	54
Ilustración 25 Disponibilidad en el acuífero del Río Culiacán	55
Ilustración 26 Humedales potenciales en la cuenca del Río Culiacán.....	56
Ilustración 27 Región hidrológica prioritaria en la cuenca del Río Culiacán	57
Ilustración 28 Sitios prioritarios acuáticos para la conservación de la biodiversidad en la cuenca del Río Culiacán	58
Ilustración 29 Regiones terrestres prioritarias en la cuenca del Río Culiacán	59
Ilustración 30 Presas en función de altura de cortina en la cuenca del Río Culiacán	60
Ilustración 31 Presas en función del almacenamiento en la cuenca del Río Culiacán	61
Ilustración 32 Presa Adolfo López Mateos (Conagua, 2011).....	61
Ilustración 33 Presa Sanalona (CONAGUA,2011).....	62



Ilustración 34 Disponibilidad de agua en la cuenca del Río Culiacán (CONABIO, 2008)	65
Ilustración 35 Estaciones hidrométricas en la Cuenca del río Culiacán	66
Ilustración 36 Subcuencas en estudio	69
Ilustración 37 Datos de entrada en el programa IHA.....	82
Ilustración 38 Índice de sitios con declaratoria oficial en la cuenca del río Culiacán.....	85
Ilustración 39 Índice de sitios propuestos en la cuenca del río Culiacán	86
Ilustración 40 Índice de impacto ambiental en la cuenca del río Culiacán	87
Ilustración 41 Conservación ambiental de la cuenca del río Culiacán	88
Ilustración 42 Registro de datos diarios y caudal ecológico.....	89
Ilustración 43 Caudal máximo de 1 día en EH 10018	90
Ilustración 44 Caudal máximo de 30 días en EH 10018	90
Ilustración 45 Alteración de caudal mensual en EH 10018.....	91
Ilustración 46 Factores de alteración hidrológica en EH 10018.....	92
Ilustración 47 Caudales máximos de 1 día EH 10033 Palos Blancos	96
Ilustración 48 Caudales máximos de 1 día Eh 10041 Sanalona I.....	97
Ilustración 49 Alteración del caudal mensual en EH 10033	97
Ilustración 50 Método RVA EH 10033	98
Ilustración 51 Alteración del caudal mensual 10041 Sanalona I.....	98
Ilustración 52 Método RVA EH 10041 Sanalona I	99



Introducción

Es una necesidad humana el abastecimiento de agua potable, lamentablemente con el paso de los años este recurso es más escaso. El volumen y la distribución del agua dulce en la Tierra han cambiado notablemente como resultado de los esfuerzos humanos por controlarlos y manejarlos para satisfacer sus necesidades vitales y en beneficio de intereses económicos y políticos (Toledo, 2006).

De acuerdo con la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de 1,386 millones de km³, de los cuales el 97.5% es agua salada y el otro 2.5% es agua dulce. El 70% de agua dulce no está disponible para consumo humano porque se encuentra en forma de glaciares o nieve. El agua que está disponible para que sea consumida, se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos (equivalente a menos del 1%). Alrededor del 30% del agua dulce es subterránea (CONAGUA, 2018).

Conforme la población mundial crece, también aumentan las extracciones de agua, esto trae como consecuencia el aumento del grado de presión sobre los recursos hídricos. La situación en México no se encuentra del todo estable, ya que el país está situado en el octavo lugar de países con mayor extracción de agua (CONAGUA, 2011)

Un aspecto fundamental para el desarrollo del país ha sido la construcción de grandes presas para resolver problemas hídricos, lo cual ha tenido repercusiones buenas, ya que el agua almacenada se utiliza para abastecer de energía eléctrica y agua para la población, pero también consecuencias negativas, como el impacto ambiental. De acuerdo con Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México cuenta con más de 5 mil presas y bordos, de ellas, 180 grandes presas representan el 82% de la capacidad de almacenamiento total de agua. Algunas de las principales presas son: Dr. Belisario Domínguez en Chiapas, Infiernillo en Guerrero, Internacional La Amistad en Coahuila y Adolfo López Mateos en Sinaloa (INEGI, 2018).

El presente trabajo de tesis fue desarrollado como parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, IG100421 “Análisis de las interacciones entre las aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable”.

Planteamiento del problema

En las cuencas de aportación al Golfo de California, se encuentran diversas problemáticas, destacándose la construcción de grandes presas como una de las principales fuentes de preocupación. Estas obras pueden tener repercusiones significativas, como la alteración de los flujos de los ríos entre otros efectos adversos.



Este contexto plantea un desafío considerable en la gestión integral de las cuencas hidrográficas, ya que es importante abordar de forma prioritaria la planificación y administración de estas áreas para desarrollar planes de gestión sostenible. Esto se vuelve importante para mitigar las amenazas que generan el deterioro ambiental y asegurar la preservación a largo plazo de los recursos naturales de la región.

Justificación

El presente trabajo de tesis se dirige a la evaluación de la caracterización del grado de conservación del Río Culiacán y el análisis de los efectos que ocasionan las grandes presas. Para ello, se requieren evaluaciones cuantitativas de los cambios que ocurren dentro de un ecosistema. Con los resultados se podrá determinar si es necesario desarrollar estrategias de planeación de adaptación para la cuenca.

Objetivos

Objetivo General

Aplicar métodos ecohidrológicos para conocer el grado de conservación ambiental de la cuenca del Río Culiacán y analizar los cambios en el régimen de flujo en el río del mismo nombre por la construcción y operación de grandes presas

Objetivos Específicos

- Evaluar la condición de conservación en la cuenca del Río Culiacán mediante el análisis de variables ambientales.
- Analizar el estado de los escurrimientos mediante el concepto de caudal ecológico.
- Hacer uso de la metodología IHA para caracterizar el régimen del flujo y evaluar las alteraciones y consecuencias por la construcción de las presas
- Emplear la metodología RVA para evaluar las políticas de operación y gestión del agua disponible

Descripción del trabajo

Este documento consta de VI capítulos, en el capítulo I Marco teórico se presenta la teoría de los métodos utilizados en el estudio, iniciando con una breve explicación del ciclo hidrológico y sus componentes fundamentales. Posteriormente, se detalla el método de los índices ambientales para determinar el grado de conservación en cada una de las subcuencas, basándose en el estudio de Cantú et al. (2018). Además, se describen conceptos clave como la alteración ecohidrológica, series de tiempo, caudal ecológico y análisis de tendencias, las consecuencias de la alteración ambiental y del cambio del régimen de flujo.

En el capítulo II Zona de estudio se ofrece una descripción detallada de la cuenca del Río Culiacán, incluyendo su localización y características generales, el análisis de aspectos climatológicos, tipos



y usos de suelo, zonas de importancia ecológica, la infraestructura hidráulica, usos y disponibilidad de agua en la cuenca. También contiene información sobre las estaciones hidrométricas y extensión de los registros disponibles.

El capítulo III Metodología se organiza en dos partes principales:

La primera es la evaluación del grado de conservación en la cuenca del Río Culiacán, siguiendo el enfoque del estudio de Cantú et al. (2018). Se aplican índices ambientales específicos para cada subcuenca (río Humaya, río Tamazula y río Culiacán), para diagnosticar la situación de conservación y los factores de impacto ambiental.

En la segunda parte se lleva a cabo un análisis de las tendencias y caracterización de los caudales. Se ocupan metodologías diversas para evaluar las alteraciones en el flujo, debido a la construcción de las grandes presas. Este análisis incluye indicadores hidrológicos y el análisis de variabilidad propuestos por Richter (1996; 1997;1998), permitiendo entender mejor las dinámicas del régimen de flujo en la estación hidrométrica,





I. Marco teórico

En este capítulo se presentan algunos aspectos teóricos fundamentales sobre conceptos hidrológicos, posteriormente se continúa con la caracterización y alteración ambiental de una cuenca; finalmente se aborda la evaluación del cambio de régimen de flujo mediante distintas metodologías y se describen algunas de sus consecuencias.

1.1. Antecedentes

Para evaluar el grado de conservación de una cuenca hidrográfica Cantú et al. (2018) proponen un método que implica el análisis de 48 variables ambientales y la creación de índices basados en mapas digitales proporcionados por instituciones como la Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO), INEGI, Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

El método propuesto por Cantú et al. (2018) incluye la determinación de tres índices principales: el índice con Declaratoria Oficial, que representa instrumentos políticos de conservación con reconocimiento nacional e internacional; el índice Prioritario Propuesto, que identifica sitios con características ecológicas importantes, pero que no cuentan con un reconocimiento oficial; y el índice Ambiental, que considera las características del ambiente y las actividades humanas que afectan las cuencas.

Estos tres índices son utilizados para definir el índice de conservación de la cuenca, el cual sintetiza la condición relativa y la capacidad de conservación de la biodiversidad de cada cuenca. Cantú et al. (2018) evaluó el grado de conservación de catorce cuencas hidrográficas en Nuevo León y determinó que, a pesar de ser las cuencas con mayor número de instrumentos legales, dos de ellas presentaban altos impactos ambientales. Además, se demostró que tres de las cuencas marginales tienen los valores máximos en el Índice de Sitios Prioritarios, mientras que cinco cuencas, cuatro de ellas marginales, mostraron un índice de grado de conservación positivo, lo que indica que el impacto ambiental es menor a los atributos de conservación en estas áreas.

Para la evaluación ecohidrológica, Richter (1997) propone un enfoque que se basa en las diferencias del régimen de flujo entre dos periodos de tiempo determinados. Estos dos periodos se refieren a años antes y años después de la construcción de la infraestructura hidráulica.

Para ilustrar este enfoque, lo aplicó a un caso de estudio en la cuenca superior de los ríos Colorado y Green en Estados Unidos. Encontró que las desviaciones de los gastos comenzaron a mediados del siglo XIX con la construcción de la primera presa en 1910, después se construyeron 25 embalses adicionales. Los resultados del análisis RVA (método enfoque de rango de variabilidad) mediante 6 parámetros indican altas afectaciones por el desarrollo y operación de la cuenca alta, reducción sustancial del rango anual de variación en las magnitudes de flujo por las presas a lo largo de los dos ríos, alteraciones en todos los parámetros hidrológicos (flujos más bajos, flujos máximos de un



día y tiempo de ocurrencia de los mínimos anuales y máximos diarios) por las presas de la cuenca superior del río Colorado.

1.2. Conceptos hidrológicos

Es importante comprender la función de las cuencas hidrográficas y reconocer que nosotros como habitantes de estas mismas, somos los generadores de los impactos ambientales. A continuación, se presentan algunos aspectos que deben considerarse.

Una cuenca hidrográfica es la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. En otras palabras, es un área delimitada por un parteaguas, por donde transita el agua hacia una corriente principal. Se compone de tres partes: alta, media y baja, lo que lleva a una función diferente cada zona. La zona alta (captación) corresponde al área montañosa del lugar, en la zona media (almacenamiento) se unen las aguas del área montañosa en un río principal y en la zona baja (descarga) desembocan las aguas a un río mayor o en el mar (AGUA, 2019).

Las cuencas hidrográficas se clasifican en tres tipos:

- Exorreicas (abiertas): el río principal vierte el agua en el mar.
- Endorreicas (cerradas): no tiene salida, normalmente el caudal principal vierte el agua en un lago.
- Arreicas: todo lo que escurre, se infiltra. No tiene salida hacia ningún cuerpo de agua.

El estudio de las cuencas permite entender el ciclo hidrológico e identificar los impactos como el cambio de régimen de precipitación, temperatura y escurrimientos ocasionados por las actividades humanas que posteriormente afectan los ecosistemas y la calidad de vida de los seres vivos.

En este contexto, México se integra de 37 regiones hidrológicas y en 13 regiones hidrológico-administrativas, con el objetivo de garantizar que la cuenca hidrográfica sea la base para desarrollar estudios de disponibilidad, hidrológicos, de calidad del agua y para la gestión y la administración del agua (CONAGUA, 2019).

El agua es el recurso más importante de la cuenca hidrográfica, en donde interactúan varios elementos como los componentes naturales y las actividades humanas relacionados de distintas formas (ilustración 2). La cuenca cumple con la función de captar, concentrar y desalojar el agua gracias a los procesos naturales, producto de las fases del ciclo hidrológico, asociado al factor humano como la principal causa de alteración de los flujos para satisfacer las necesidades humanas, por medio de la construcción de infraestructura hidráulica (ilustración 1).

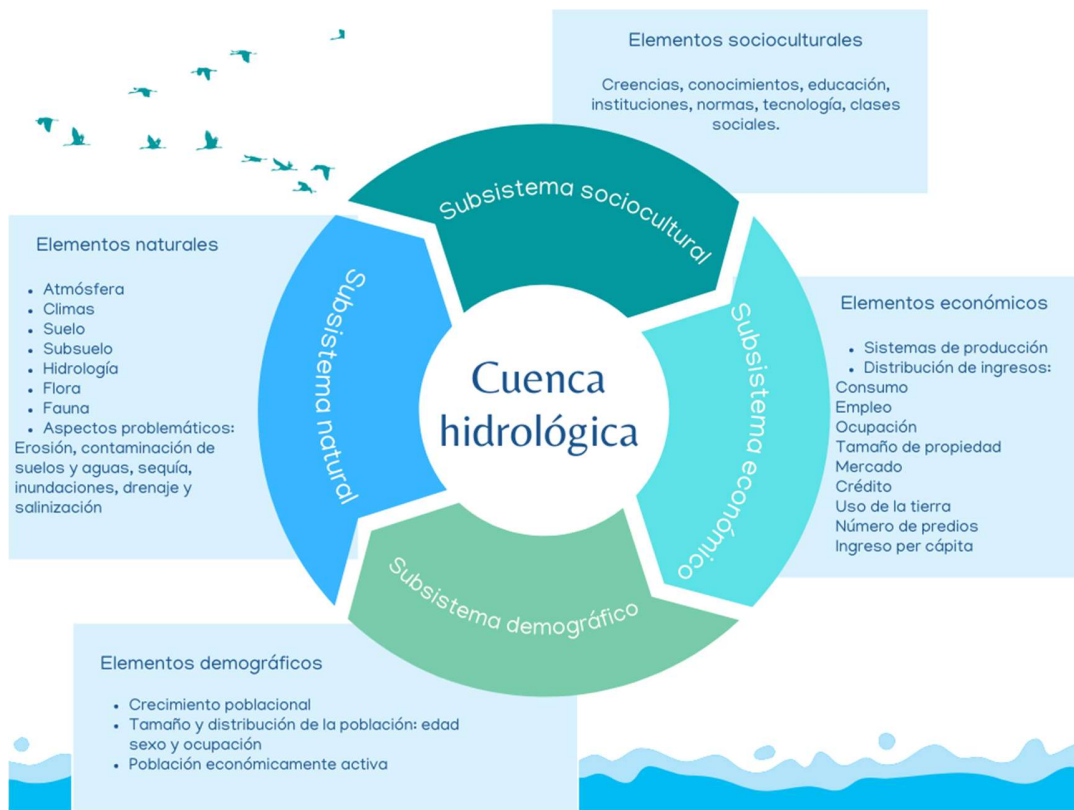


Ilustración 1 Componentes naturales e interacciones de una cuenca hidrográfica (Zuri, 2004)

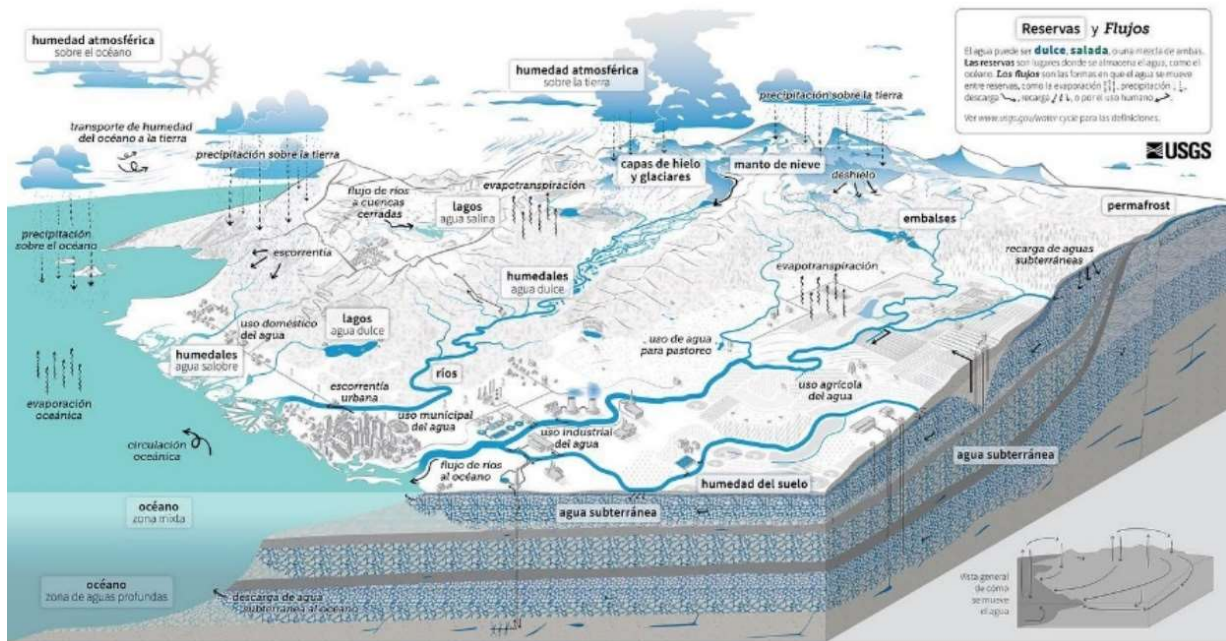


Ilustración 2 Ciclo del agua (USGS, 2019)



El ciclo del hidrológico tiene procesos en el que el agua va cambiando su estado entre líquido, sólido y gaseoso (ilustración 2), en el cual transita el agua de la siguiente forma (USGS, 2019):

“El agua se mueve entre la atmósfera y la superficie a través de la **evaporación**, la **evapotranspiración** y la **precipitación**. El agua se mueve a través de la superficie a través del deshielo, la **escorrentía** y el flujo de los ríos. El agua se mueve hacia el subsuelo a través de la **infiltración** y la recarga de agua subterránea. Bajo tierra, el agua subterránea fluye dentro de los acuíferos. Puede regresar a la superficie a través de la descarga natural de agua subterránea a los ríos, océano y de los manantiales.”

Los principales componentes que rigen al ciclo hidrológico son:

- 💧 **Evaporación:** El agua en estado líquido en la superficie se transforma en vapor de agua y se transfiere hacia la atmósfera. En este proceso es importante tener en consideración el suministro de energía para proveer el calor latente y la facilidad de transporte entre la superficie de la Tierra hacia la atmósfera que depende principalmente de la velocidad del viento. La evaporación se mide con ayuda de instrumentos llamados evaporímetros.
- 💧 **Evapotranspiración:** Es la evaporación y transpiración de las plantas (agua que despiden las plantas en forma de vapor y que toman del suelo).
- 💧 **Precipitación:** Las nubes formadas en el proceso de evaporación permiten el cambio de estado gaseoso a líquido y liberan agua. De acuerdo con Campos (1998), la precipitación tiene distintas clases como la lluvia, llovizna, aguacero, granizo y nieve, depende principalmente de la ascendencia y la temperatura del aire debajo de las nubes. Los lugares en donde es común la nieve son en las zonas montañosas y lluvia en los valles.
- 💧 **Escurrimiento:** Es el movimiento del agua que circula sobre la superficie o debajo de ella (Aparicio, 1992). El escurrimiento se clasifica en escurrimiento superficial (flujo sobre la superficie y corrientes de los ríos), escurrimiento subsuperficial (flujo que se infiltra o escurre paralelamente a ella) y escurrimiento subterráneo (el flujo que llega hasta niveles freáticos).
- 💧 **Infiltración:** Es el movimiento del agua en el cual esta misma penetra al suelo gracias a las fuerzas gravitacionales y capilares. Existen algunos factores que influyen en este proceso como la textura del suelo, el contenido de humedad, cobertura vegetal, el uso del suelo, aire atrapado, la compactación, la temperatura, cambios y diferencias.

1.3. Caracterización ambiental de una cuenca

Los conceptos anteriores permiten comprender la funcionalidad de la cuenca y los factores que intervienen en su funcionamiento para su manejo adecuado, pero se requieren procesos de



planeación e implementación de acciones para conservar los recursos naturales sin dejar de reconocer las necesidades humanas con el fin de evitar riesgos hídricos. La conservación de una cuenca depende en gran medida de las actividades humanas, por lo que la cuenca debe tener la capacidad de mantener su estado de conservación en el futuro.

Los flujos de agua en los ríos desempeñan un papel fundamental en el equilibrio del planeta. Estos flujos sostienen procesos, funciones e integridad ecológica. Su objetivo principal es satisfacer las necesidades humanas, como el suministro de alimentos y la regulación de sequías e inundaciones. Sin embargo, a lo largo de los años, este régimen de flujos ha sido alterado debido a la construcción de infraestructuras hidráulica (Salinas, 2021).

Los ríos se van modificando con la construcción de las presas para el control de avenidas, extracciones para el suministro hidroeléctrico, agrícola y urbano, y para mantener el caudal adecuado para la navegación y el drenaje (González et al, 2015).

Si bien, el propósito de estas estructuras es almacenar agua para su uso posterior en momentos oportunos, esto implica modificar el régimen hidrológico, así como controlar los picos de eventos y aumentar los caudales mínimos. Pero cada aspecto de la biodiversidad depende de este régimen de flujos y su alteración ha tenido un impacto significativo en los ecosistemas fluviales.

La conservación de la biodiversidad, la protección de los servicios ambientales y la restauración ecológica de la diversidad de los sistemas acuáticos epicontinentales (ubicado en territorio mexicano) representan un gran reto socioeconómico debido a que el agua es un elemento esencial para el desarrollo económico del país (Bezaury, 2017).

De acuerdo con Catú et al. (2018), es fundamental determinar el grado de conservación para analizar la condición de la cuenca, y esto se logra a través de la creación de índices. Un índice se define como la relación entre un valor de interés y un estándar de comparación. En este documento, el valor de interés corresponde a una estimación de la condición de la cuenca, mientras que el estándar de comparación es la condición óptima de la condición del hábitat para la misma zona de estudio. Para ello, se presentan a continuación los índices establecidos (Cantú et al., 2018):

Índice de sitios con declaratoria oficial: Identifica los sitios reconocidos por el gobierno mexicano a nivel nacional e internacional, los cuales cuentan con medidas legales de protección y conservación, entre ellos:

- ❖ **Áreas naturales protegidas:** Son áreas que pertenecen al territorio mexicano que tienen el objetivo de preservar y conservar ambientes naturales que representan al país (ilustración 3). Estas áreas corresponden al territorio terrestre o acuático, pueden ser reservas de la biosfera, parques nacionales, áreas de protección de la flora y fauna, áreas de protección de recursos naturales, monumentos naturales, santuarios y áreas destinadas voluntariamente a la conservación. Se establecen por medio de una declaratoria expedida

por el presidente, dependiendo de la opinión de los gobiernos locales y dependencias gubernamentales (CONANP, 2023)

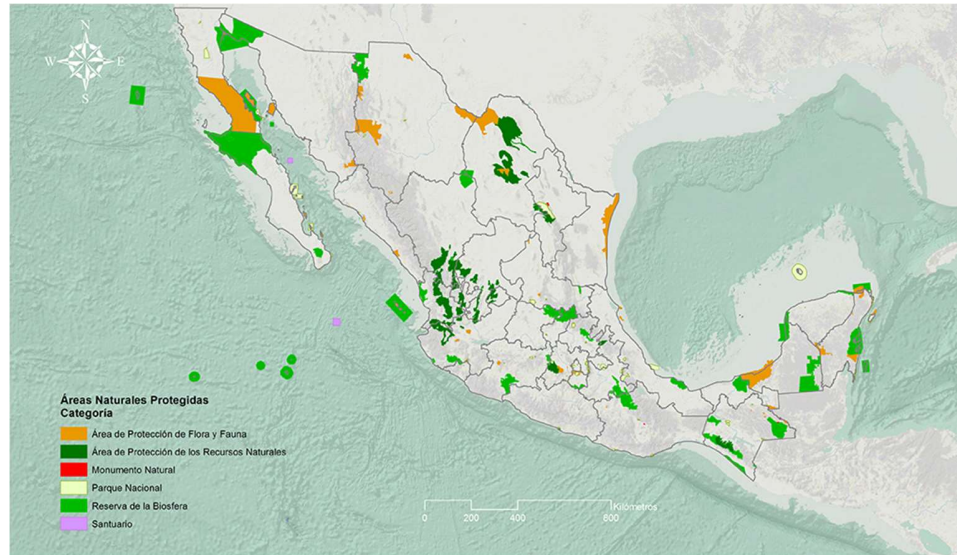


Ilustración 3 Áreas Naturales Protegidas (SEMARNAT, 2023)

- ❖ **Humedales de importancia internacional (sitios Ramsar):** Los humedales son áreas en donde la superficie del suelo es cubierta de agua en forma intermitente o permanente, estos sitios son importantes para el país porque son vitales para el equilibrio de los mantos acuíferos que regulan el flujo de los ríos, reducen la fuerza de las tormentas y estabilizan la erosión de la línea costera (ilustración 4). México tiene 142 sitios catalogados como Ramsar con aproximadamente una superficie de 8 millones de hectáreas (CONAFOR, 2018). Un sitio Ramsar, incluye un tratado que contiene medidas para la conservación y el uso racional de estos sitios que debe cumplir el gobierno mexicano.

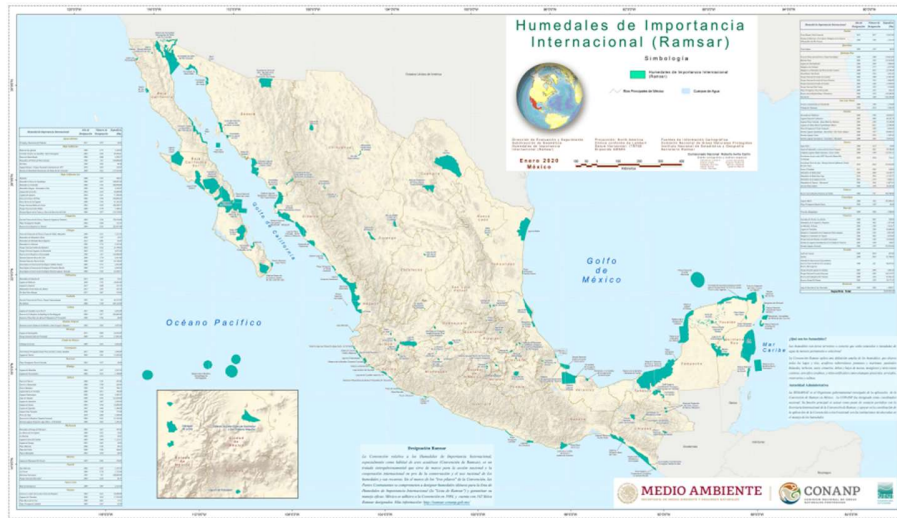


Ilustración 4 Sitios RAMSAR (CONANP, 2023)

- ❖ **Unidades de manejo para la conservación de vida silvestre (UMA):** Son sitios con planes de manejo debidamente aprobados, destinados a la conservación de las especies silvestres que habitan en el lugar (ilustración 5). Tienen el objetivo de restauración, protección, mantenimiento, recuperación, reproducción, repoblación, reintroducción, investigación, rescate, resguardo, rehabilitación, exhibición, recreación, educación ambiental y aprovechamiento sustentable (SEMARNAT, 2018).

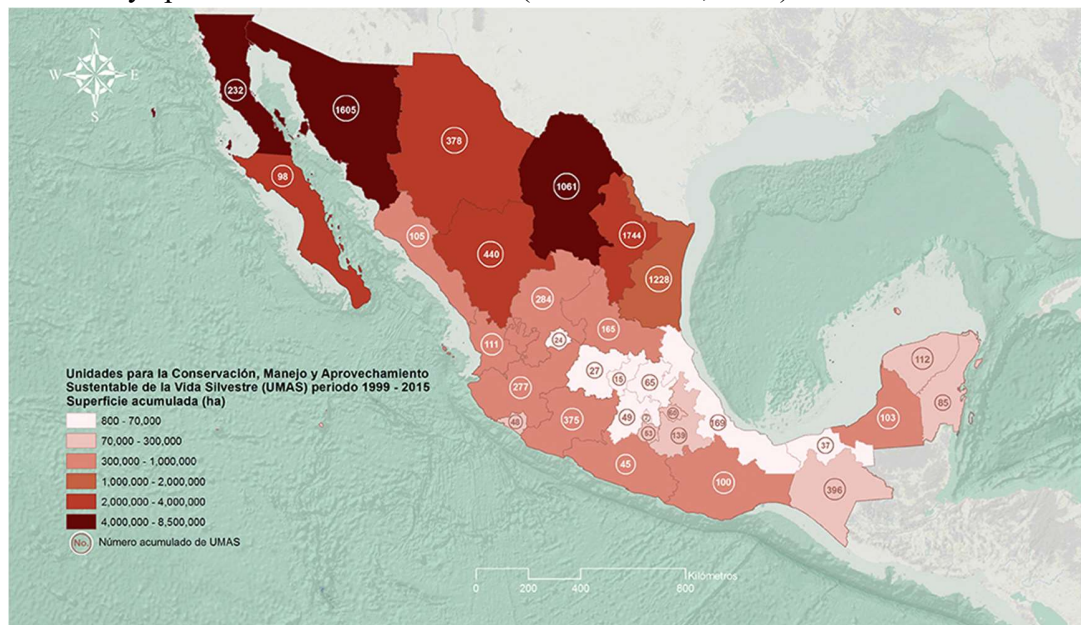


Ilustración 5 Unidades para la conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre (SEMARNAT, 2023)

Índice de sitios prioritarios propuestos: Al contrario de los sitios con declaratoria oficial, estos sitios no tienen algún decreto oficial reconocido internacionalmente, pero son considerados importantes debido a sus características ambientales; estos son:

- ❖ **Región hidrológica prioritaria:** A través de un análisis, la CONABIO estableció el programa de Regiones hidrológicas Prioritarias con el fin de identificar las subcuencas con áreas importantes de acuerdo con la biodiversidad y el uso de recursos con algún tipo de amenaza. Como resultado del estudio, se identificaron 110 regiones hidrológicas prioritarias (ilustración 6, CONABIO, 2017).

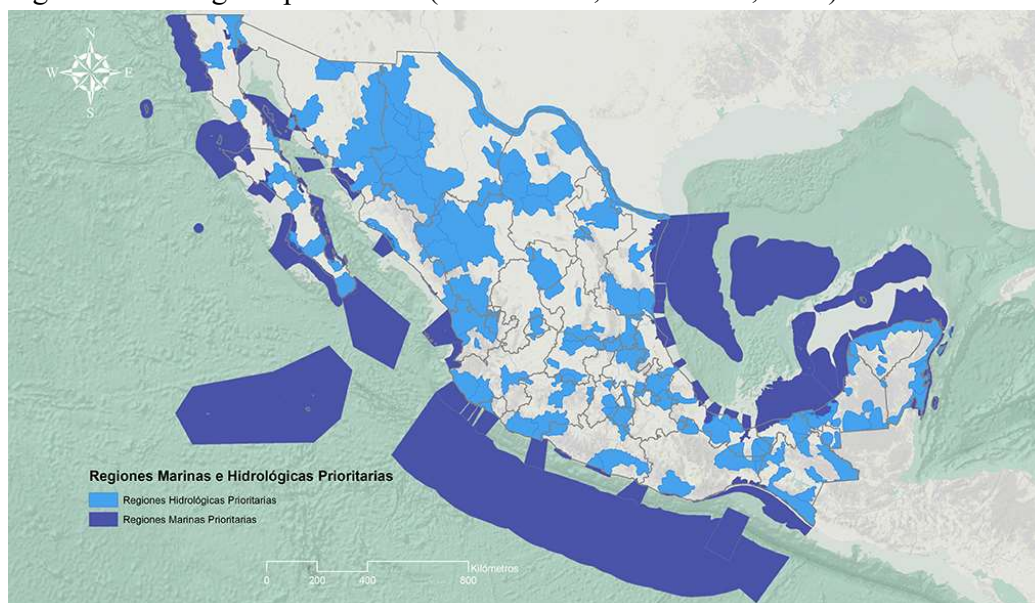


Ilustración 6 Regiones hidrológicas prioritarias (SEMARNAT, 2023)

- ❖ **Servicios ambientales hidrológicos:** Es un programa que administra la CONAFOR, en donde se les paga a las personas dueñas de terrenos, como los bosques y selvas para ayudar a su conservación y con ello regular el ciclo hidrológico con medidas para no afectar la calidad del agua.
- ❖ **Conservación de la biodiversidad:** Es una estrategia elaborada por la CONAFOR, que busca adecuar con medidas la protección, conservación y restauración de la biodiversidad, en gran medida a ecosistemas forestales (ejidos y comunidades).
- ❖ **Hexágonos terrestres prioridad alta, media, baja:** Son sitios que señalan grandes retos de conservación. Los hexágonos representan la identificación de los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad (ilustración 7). Estos sitios se establecen de acuerdo con un análisis espacial con base en las variables biológicas para las que son definidas metas de conservación.



Ilustración 7 Hexágonos terrestres (SEMARNAT, 2023)

- ❖ **Regiones Terrestres Prioritarias (RTP):** Son áreas generalizadas, representan los sitios en los que la conservación de los ecosistemas es de prioridad para preservar las especies endémicas que habitan. México tiene 152 Regiones Terrestres Prioritarias (ilustración 8), cubren más de la cuarta parte del territorio nacional, concentrándose la mayor parte al sur de la república (SEMARNAT, 2023).



Ilustración 8 Regiones Terrestres Prioritarias (SEMARNAT, 2023)

- ❖ **Sitios de atención prioritaria extrema, alta y media para la conservación:** Son áreas identificadas para promover acciones y estrategias de desarrollo territorial sustentable (CONABIO, 2012). Ver ilustración 9.

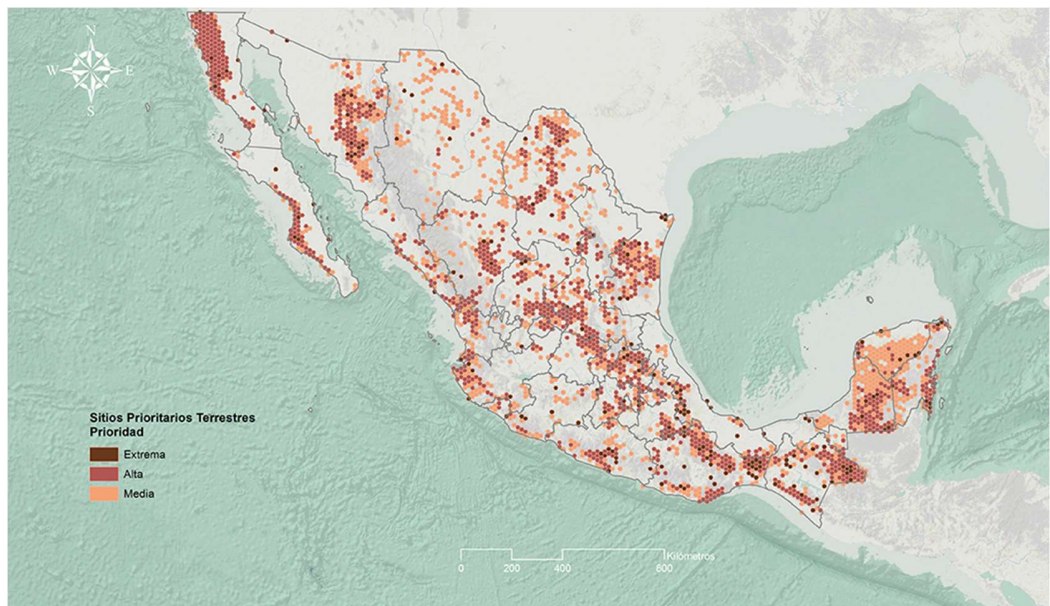


Ilustración 9 Sitios de atención prioritaria extrema, alta y media para la conservación (SEMARNAT, 2023)

- ❖ **Áreas de importancia para la conservación de las aves:** Son áreas importantes para la conservación de las aves (ilustración 10).

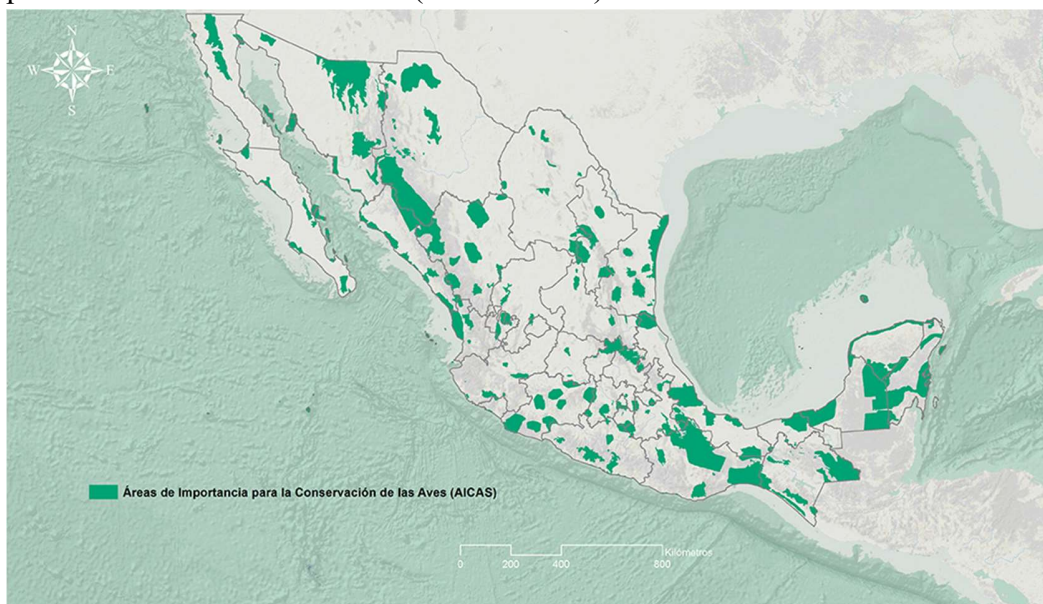


Ilustración 10 Áreas de importancia para la conservación de aves (SEMARNAT, 2023)

Índice de impacto ambiental: Son características del ambiente que interfieren en la captación de agua y actividades humanas, causando efectos negativos en las cuencas, como son:



- ❖ **Consumo de agua de uso urbano, pecuario y agrícola.** El consumo urbano de agua se refiere a la cantidad necesaria para suministrar agua potable a una comunidad. Por otro lado, el consumo pecuario se refiere al agua necesaria para las actividades ganaderas. Por último, el uso agrícola de agua se destina a la producción de alimentos a través del riego de cultivos.
- ❖ **Número de habitantes urbanos y rurales.** Se refiere a la cantidad de habitantes que residen en áreas urbanas y rurales. Se considera zona rural cuando se tienen menos de 2,500 habitantes, mientras que en una zona urbana viven más de 2,500 personas (INEGI, 2020).
- ❖ **Proporción con manchas urbanas y rurales.** Se refiere a la porción geográfica altamente poblada, los espacios urbanos suelen tener un desarrollo comercial y tecnológico, la zona rural es caracterizada por tener viviendas y población dispersas, ocupan grandes espacios para actividades agropecuarios o agroindustriales.
- ❖ **Total de agua disponible vs demanda de balance hídrico.** El total de agua se refiere el total de agua que hay en la cuenca hidrográfica y la demanda de balance hídrico implica comparar el total de agua existente en la cuenca con la demanda.
- ❖ **Volumen promedio disponible de agua en acuíferos.** Es la cantidad de agua que se encuentra almacenada en un acuífero.
- ❖ **Ajuste proporcional de la disponibilidad de acuíferos:** La disponibilidad de agua subterránea se define como el volumen medio anual de agua extraída de los acuíferos. Cuando este valor es negativo, indica un déficit en el acuífero.
- ❖ **Proporción de erosión eólica.** Es el porcentaje de suelo que se erosiona por acción del viento.
- ❖ **Proporción hídrica en cárcavas y laminar.** Es el porcentaje de suelo que se erosiona por acción del agua.
- ❖ **Proporción de erosión antrópica.** También llamada erosión acelerada, se refiere al porcentaje de suelo que se erosiona debido a la destrucción de la vegetación existente.
- ❖ **Proporción por rango de evaporación real.** La evaporación que se produce dependiendo de las condiciones de cada sitio.
- ❖ **Puntos de calor por incendios forestales.** Se refiere a las áreas en las cuales se detectan mediante sensores, altas radiaciones, lo que indica que es probable la presencia de fuego.
- ❖ **Proporción de la cuenca con veda.** Las zonas de veda son áreas de las regiones hidrológicas en las que no están autorizados los aprovechamientos de agua adicionales a lo establecido legalmente (Senado, 2018).
- ❖ **Incremento de usos antrópicos entre Series de Uso del Suelo 5 y 1.** Se refiere a indicar si existe algún uso diferente entre las dos series de uso de suelo.

Índice de grado de conservación: sintetiza la condición relativa, se obtiene tras la normalización de los valores de los índices de sitios con declaratoria oficial, sitios prioritarios propuestos, menos



el valor de Índice de impacto ambiental. Este índice representa la capacidad de una cuenca para conservar la biodiversidad.

Como indica Cantú et al. (2018), los datos de las variables se normalizan mediante la división de los valores para cada una de las variables entre el valor máximo de la misma, de tal forma que todos los datos se encuentran entre 0 y 1, esto es (Ecuación 1):

$$V_n = \frac{V_{var}}{V_{max}V_{var}}$$

Ecuación 1

Donde V_n es el valor normalizado, V_{var} el valor de cada variable y $V_{max}V_{var}$ el valor máximo de la variable.

Los valores son ponderados con base en la importancia de cada variable, mediante una escala k_p (tabla 1).

Tabla 1 Valores de ponderación K_p

Escala	
2	Muy bajo
4	Bajo
6	Medio
8	Alto
10	Muy alto

Las variables normalizadas se multiplican por el valor de ponderación asignado (Ecuación 2).

$$V_p = V_n \times K_p$$

Ecuación 2

Donde V_p es el valor ponderado, V_n el valor normalizado y K_p la constante de ponderación asignada a la variable.

Con el fin de igualar el peso de todas las variables, el resultado de la normalización se divide entre 100; el resultado se multiplica por el valor ponderado de cada cuenca, obteniendo el índice respectivo (Ecuación 3):

$$II = \sum [(V_p V_1 \times k_i) + (V_p V_2 \times k_i) + (V_p V_3 \times k_i) + \dots + (V_p V_n \times k_i)]$$

Ecuación 3

Donde II es el índice de interés, $V_p V_1$ el valor ponderado de la variable 1, $V_p V_n$ el valor ponderado de la variable n y K_i la constante de interés.



1.4. Alteración ecohidrológica

La escasez de agua es un desafío que se presenta a nivel global, este problema tiene un impacto significativo, pues en las últimas cuatro décadas se ha registrado una alarmante pérdida del 84% de la biodiversidad en fuentes de agua dulce. Además, próximamente el 40% de las especies que dependen de los humedales han sufrido una disminución en su abundancia. También se ha observado una ruptura en la conectividad de dos tercios de los ríos más grandes (Salinas, 2021).

Estas problemáticas tienen consecuencias graves, como la crisis hídrica. Un ejemplo de ello es que actualmente, gran parte de la población mundial enfrenta una escasez severa de agua. Se estima que la demanda global de agua aumentará un 55% para el año 2050, lo cual podría empeorar debido al impacto climático, especialmente en áreas con climas áridos o semiáridos (Salinas, 2021).

Así, la protección de los recursos humanos de agua dulce mundiales requiere que el impacto de origen humano sobre el medio ambiente y el clima sea abordado de manera integrada (UNESCO, 2018).

Para garantizar el desarrollo de las actividades productivas, la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) delimitó las cuencas hidrográficas, considerando principalmente que estas proveen el suministro de agua. Sin embargo, en 1992, con la promulgación de la Ley de Aguas Nacionales, se estableció una nueva concepción de la cuenca hidrográfica como un territorio integral, se reconoce la importancia de llevar a cabo acciones de conservación y manejo sustentable del recurso hídrico en la cuenca, con el fin de asegurar la disponibilidad de agua a largo plazo. En este contexto, es importante establecer un enfoque hacia la gestión sustentable del agua y comprender como los procesos hidrológicos y el ecosistema son afectados.

Por tanto, al reconocer los desafíos hídricos y la necesidad de dar un enfoque integral, es importante conocer que la ecohidrología es una ciencia integral, su enfoque central es la interacción entre la hidrología y la biota; el concepto originalmente se orienta en métodos para reducir el impacto antrópico de los ecosistemas. El objetivo principal es lograr la sostenibilidad tanto de los ecosistemas como en la población (UNESCO, 2018)

En este contexto, la ecohidrología representa una nueva aproximación a la restauración y gestión sustentable del recurso hídrico y provee una herramienta adicional para la administración de la degradación ecológica del agua y de sus procesos en la superficie (Zalewski, 1997).

La ecohidrología se basa en los principios siguientes (Zalewski, 1997):

1. Restablecer y mantener los procesos evolutivos de circulación del agua, nutrientes y energía a escala de una cuenca hidrográfica.
2. Amplificar la capacidad de carga y resiliencia de los ecosistemas frente a la presión antrópica.

3. Usar las propiedades de los ecosistemas como herramientas de gestión del agua.

Las alteraciones significativas de la calidad ambiental de los ríos provocadas por las intervenciones antrópicas y el cambio climático son ampliamente conocidas, y amenazan la provisión de bienes ecológicos y servicios ecosistémicos que prestan los entornos acuáticos.

La deforestación masiva, la urbanización y el desarrollo de infraestructura son algunos de los factores que han tenido un impacto significativo en los sistemas acuáticos. Estas actividades humanas han llevado a una alteración en la calidad del agua, dando como resultado la disminución de la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas (ilustración 11). Además, la deforestación a gran escala tiene consecuencias negativas, como la pérdida de la vegetación en las cuencas y en los ríos, que actúan como una barrera natural para filtrar los contaminantes y estabilizar los cuerpos de agua. El desarrollo de infraestructura, como presas, canales y carreteras, también modifica los patrones del flujo de agua (Zalewski, 1997).



Ilustración 11 Alteración en los ríos provocadas por intervenciones antrópicas (izq.) y restauración del río (der.) (IMTA, 2020)

Una de las principales causas por la que una cuenca es alterada es la construcción de infraestructura hidráulica (presas, diques de protección, embalses, etc.). Son obras diseñadas para aprovechar los recursos hídricos, cuyos objetivos son el desarrollo hidroeléctrico, control de inundaciones, riego, abastecimiento de agua potable.

La modificación del régimen hídrico de los ríos ocasionada por la construcción de infraestructura hidráulica ha alcanzado dimensiones alarmantes en algunas regiones del mundo. En México, uno de los ejemplos de alteración hidrológica es el río Bravo, el cual ha registrado un caudal nulo en su desembocadura por causa de la retención de todo su volumen hídrico para su derivación hacia ciudades y grandes distritos de riego (Garrido, 2010).



Uno de los objetivos en la gestión de los ecosistemas es mantener la integridad del ecosistema protegiendo la biodiversidad y los procesos ecológicos.

1.5. Series de tiempo

Una serie de tiempo se define como una sucesión de datos, su objetivo principal es desarrollar modelos estadísticos para explicar el comportamiento de un evento (climatológico, hidrológico, hidráulico, etc.) que varíe con el tiempo o la distancia. Las series de tiempo están sujetas a un intervalo de observaciones, por lo que pueden ser periódicas (diarias, semanales, mensuales, estacionales) o anuales (Escalante, 2002).

Las series de tiempo son herramientas importantes en la hidrología ya que permiten comprender y analizar sucesos en el tiempo relacionados con el agua; pueden ser univariadas y multivariadas. Una serie univariada son aquellos datos anuales de una variable (precipitación o escurrimiento) en una sola estación. Una serie multivariada, es una muestra de datos en varias estaciones de registro al mismo tiempo. (Escalante, 2002).

Las medidas de tendencia central y distribución de una serie de tiempo son:

- Media: permite conocer la tendencia central (Ecuación 4).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 4

- Desviación estándar: permite conocer que tan dispersos están los valores de una serie respecto a su media (Ecuación 5).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 5

- Varianza: es el cuadrado de la desviación estándar (Ecuación 6).

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Ecuación 6

- Coeficiente de variación: es la relación entre la desviación estándar y la media. Se utiliza para comparar series de tiempo distintas (Ecuación 7).

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} (100)$$



Donde x_i es valor individual de la muestra y n es el número de datos de la muestra.

Las componentes de la serie de tiempo son:

- Tendencia secular: muestra el comportamiento general para un fenómeno a largo plazo.
- Variación estacional: muestra la variabilidad de los datos debida a la influencia de las estaciones.
- Variación cíclica: son secuencias alternas de puntos abajo y puntos arriba de la línea de tendencia.
- Variación irregular: sea debe a los factores de corto plazo, imprevisibles y no recurrentes, explicando la variabilidad aleatoria de una serie de tiempo, ya que es impredecible. Los dos tipos de variación irregular son: las variaciones provocadas por acontecimientos especiales, fácilmente identificables y las variaciones aleatorias que no se pueden señalar de una forma exacta.

La tendencia de una serie puede ser lineal mostrando que aumenta o disminuye a un ritmo constante y la tendencia no lineal que presenta un comportamiento curvilíneo.

Los cambios en la temporalidad de los flujos de un hidrosistema fluvial pueden ser suficientes para causar grandes alteraciones ambientales. Estas modificaciones en la escala temporal producen efectos negativos sobre los patrones de reproducción y alimentación de especies acuáticas y terrestres (Toledo, 2006).

Otro efecto de los cambios de temporalidad de los flujos puede ser que algunas especies de plantas dependen de condiciones específicas y de tiempos determinados para su crecimiento y reproducción.

1.5.1 Análisis de tendencias

El análisis de tendencias consiste en pruebas estadísticas para detectar cambios en una serie de tiempo. Dos pruebas comúnmente empleadas en la literatura se describen a continuación.

Prueba de Man-Kendall. Se considera uno de los métodos más apropiados para el análisis de datos ambientales (Mann, 1945; Hernández, 2022). Es una prueba estadística no paramétrica utilizada para analizar tendencias en series de tiempo. Esta prueba permite detectar y localizar el punto aproximado de inicio de una tendencia específica. Consiste en la comparación entre los valores que componen una serie de tiempo en orden secuencial, considerando su hipótesis de estabilidad.

La ecuación que representa la estadística de Mann-Kendall es (Mann, 1945):



$$S = \sum_{k=1}^{n_1-1} \sum_{j=k+1}^{n-1} \text{signo}(x_j - x_k)$$

Ecuación 8

$$(\text{signo}(x_j - x_k)) = \begin{cases} +1, & \text{si } x > 0 \\ 0, & \text{si } x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Ecuación 9

Donde x_j y x_i son los datos estimados de la secuencia de valores, y el tamaño de la serie de tiempo, siempre que $j > i$ y n es el tamaño de la serie de tiempo.

Supone que H_0 sea verdadera y S debe presentar una distribución aproximadamente normal con media cero y varianza, esto es:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [(n * (n - 1) * (2n + 5))]$$

Ecuación 10

El resultado de S indica la posible existencia de tendencia. Si S es diferente de cero, la hipótesis nula H_0 puede ser rechazada, y la hipótesis alternativa H_1 sería aceptada.

El valor estadístico es representado por Z :

$$z = \begin{cases} \frac{S - 1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Ecuación 11

La presencia de una tendencia significativa es evaluada por el valor Z ; un valor positivo indica que hay aumento en la tendencia, mientras que un valor negativo indica disminución en la misma.

Prueba Pettitt. Es una prueba no paramétrica que se basa en rangos, empleada para identificar un punto de cambio. También se utiliza como una prueba de homogeneidad y suele aplicarse junto con la prueba de Mann Kendall (Pettitt, 1979; Hernández, 2022).

Esta prueba se compone por variables aleatorias y se define por el estadístico U :



$$U = 2W_d - d(n - 1)$$

Ecuación 12

Supone que $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ son el orden de los rangos de las observaciones $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de la serie de tiempo, como:

$$W_d = \sum_{i=1}^d R_i$$

Ecuación 13

Donde n es el número total de observaciones en la serie de tiempo; cuando U ha llegado a su máximo valor, indica una variación fuerte en la serie.

$$X_\tau = \max |U|$$

Ecuación 14

1.6. Caudal ecológico

La Norma Mexicana establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (NMX-AA-159-SCFI-2012), indica que el caudal ecológico es la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales. Uno de los principales objetivos del caudal ecológico es mantener la integridad del río y así lograr el equilibrio entre las necesidades ambientales y las necesidades humanas.

Para evaluar el caudal ecológico existen diversas metodologías clasificadas en hidrológicas, hidráulicas, simulación del hábitat y holísticas (ilustración 12). Las metodologías hidrológicas proporcionan lineamientos para establecer un régimen generalmente como un porcentaje del escurrimiento medio anual, asumiendo que se mantendrán los atributos biológicos en ciertos niveles de conservación. Los métodos hidráulicos analizan la variabilidad con la que cambian los parámetros de las corrientes con el objetivo de graficar el comportamiento y usar los puntos de cambio en las curvas para recomendar un criterio de régimen de caudal. La simulación de hábitat proyecta el hábitat físico y los cambios en función del caudal; finalmente, las metodologías holísticas son entendidos como procedimientos o protocolos de actuación, los cuales, definen el caudal ecológico como una solución proveniente de un análisis de la magnitud y distribución del caudal (Morales, 2023); este tipo de determinación de régimen se recomienda en casos donde se quiera detallar alguna propuesta de caudal ecológico. Dentro de cada clasificación existen una gran cantidad de métodos, cuya aplicación depende de la información disponible y del lugar de aplicación.

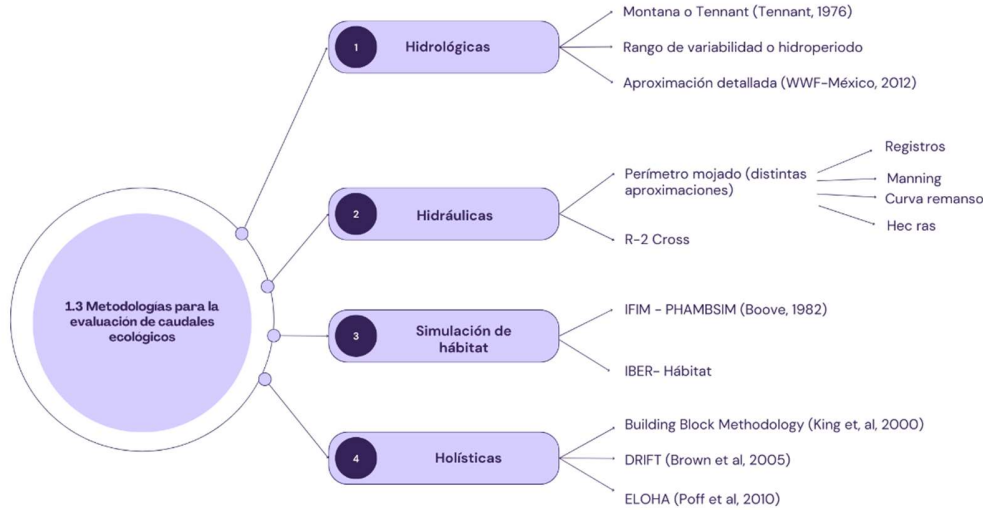


Ilustración 12 Clasificación y algunos ejemplos de metodologías para el cálculo de caudales ecológicos (Morales, 2023)

En nuestro País, la Norma Mexicana ofrece las bases para determinar el caudal ecológico por distintos métodos hidrológicos y de simulación de hábitat. Para calcular este régimen, primero, es importante establecer los objetivos ambientales a partir de la importancia ecológica y la presión de usos del agua (tabla 2).

Tabla 2 Importancia ecológica (NMX-AA-159-SCFI-2012)

Importancia ecológica	Aspectos bióticos	Aspectos de integridad ecológica	Alteración eco hidrológica
Muy alta	Una o más especies endémicas en la región que además tengan relevancia internacional, que se encuentran en algún estado de protección según la NOM-059-SEMARNAT-2010 y/o en otros listados similares internacionales.	Hábitat único por su diversidad y funcionamiento, que mantienen su estructura natural e integridad ecológica asociada a los servicios ecosistémicos aportados y que estén intactos. La zona de captación se conserva.	Nula o mínima. Se conserva el régimen natural
Alta	Al menos una especie de relevancia regional o nacional bajo algún estado de protección en la NOM-059-SEMARNAT-2010 o en listados similares internacionales.	Hábitat único por su diversidad y funcionamiento, en los que predomina su estructura natural y que básicamente conservan su integridad ecológica, y, en consecuencia, los servicios ecosistémicos que aportan.	Presencia mínima de infraestructura antropogénica (caminos, granjas, descargas domésticas de aguas residuales). Alteraciones moderadas al régimen natural.



Continuación

Importancia ecológica	Aspectos bióticos	Aspectos de integridad ecológica	Alteración eco hidrológica
		La zona de captación se conserva.	
Media	Presencia de poblaciones de diferentes especies, de relevancia regional por su aportación a servicios ecosistémicos o al desarrollo socioeconómico.	La zona de captación y el hábitat se encuentra moderadamente alterada. Conservan en alguna medida su funcionamiento, estructura y de servicios básicos, a pesar de haber presentado cambios físicos.	Presencia evidente de infraestructura antropogénica. Alteraciones evidentes significativas, pero se mantienen ciertos componentes del régimen hidrológico
Baja	Nula o muy baja presencia de especies nativas con presencia de especies exóticas.	Zona de captación sometida a fuerte presión por el agua y cambio de uso de suelo. Cauces invadidos, obstruidos, abandonados, modificados, canalizados o destruidos por actividades de extracción	Alta presencia de infraestructura antropogénica. Régimen completamente alterado.

La presión por el uso del agua (tabla 3) se determina como la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca o acuífero, conforme a la información otorgada por la CONAGUA. El nivel de la presión de uso se establece de acuerdo con los valores de la tabla 3.

Tabla 3 Presión de uso (NMX-AA-159-SCFI-2012)

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

El objetivo ambiental (tabla 4) se define como:

Tabla 4 Matriz de objetivos ambientales (NMX-AA-159-SCFI-2012)

Importancia ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
		Baja	Media	Alta	Muy alta
		Presión de uso			

- 💧 **A:** Objetivo ambiental con estado o nivel de conservación deseado muy bueno.
- 💧 **B:** Objetivo ambiental con estado o nivel de conservación deseado.



- 💧 **C:** Objetivo ambiental con estado o nivel de conservación moderado.
- 💧 **D:** Objetivo ambiental con estado de conservación deficiente.

Para determinar si existe o no afectación en un río por la presencia de infraestructura hidráulica sobre el régimen hidrológico, se encuentran los procedimientos establecidos en la NMX-AA-159-SCFI-2012. La norma establece en el **Apéndice normativo B el Procedimiento para determinar la alteración del régimen hidrológico natural en una corriente por la presencia de infraestructura.**

El procedimiento requiere de información hidrométrica diaria con 20 años completos de información de cada régimen hidrológico (natural y alterado). Si existen registros menores, se debe analizar la representatividad de esta en cuanto a años húmedos, medios, secos y muy secos.

El procedimiento que indica la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 es el siguiente:

1. Identificar las corrientes donde se realizará el estudio de los caudales ecológicos.
2. A partir de la estación hidrométrica más representativa de la zona de estudio, determinar el régimen de caudales ordinarios según el siguiente procedimiento:
 - 2.1. Ordenar a partir de la información hidrológica de la serie diaria, los caudales medios mensuales, separando las series en régimen natural (RHN) y en régimen actual (RHA).
 - 2.2. Organizar los caudales mensuales en años naturales para ambas series.
 - 2.3. Calcular para cada mes del año en la serie de régimen natural los percentiles 90 (P90) y 10 (P10), tanto mensuales y anuales. El cálculo de los percentiles se refiere a una media usada en la estadística que indica cómo se distribuyen los valores de una serie de datos (Morales, 2023).
3. Calcular para cada mes del año en la serie de régimen natural los percentiles 90 (P90) y 10 (P10), tanto mensuales y anuales. El cálculo de los percentiles se refiere a una media usada en la estadística que indica cómo se distribuyen los valores de una serie de datos (Morales, 2023).
4. Verificar si los caudales actuales de manera mensual y anual se encuentran contenidos en el régimen de caudal ordinario máximo (P90) y mínimo (P10) sugeridos en el régimen natural.
 - 4.1. Si el régimen actual cumple en magnitud mensual y anual más de un 50% con relación al régimen natural, se considera hidrológicamente no alterado.
 - 4.2. Si el cumplimiento del régimen actual es menor del 50% en su magnitud mensual y anual con relación al régimen natural, se considerará alterado.

1.7. Evaluación del cambio en el régimen de flujo

El régimen hidrológico establece la composición de la biota y la estructura de los sistemas acuáticos. En este documento se describe un procedimiento para evaluar alteraciones hidrológicas dentro de los ecosistemas debido a la construcción de las presas.

Para determinar una evaluación de los patrones de flujo de un río existen distintas metodologías, las cuales permiten identificar tendencias temporales (apartado 1.5), determinar los puntos de cambio

(apartado 1.5.1), estimar caudales ecológicos (apartado 1.6) y aplicar índices ecohidrológicos (Aragón et al. 2022).

Dentro de los índices ecohidrológicos, se encuentran los Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) basados en el estudio de datos hidrológicos disponibles en puntos de muestreo. El enfoque de esta metodología es definir una serie de tiempo hidrológica que caracterice la variación de las condiciones que permita comparar los regímenes hidrológicos antes y después de haber sido alterados por la construcción de la infraestructura hidráulica (The Nature Conservancy, 2009). Este método consta de 4 pasos (ilustración 13) y utiliza 33 parámetros hidrológicos biológicamente relevantes organizados en 5 grupos (tabla 5), con el objetivo de caracterizar estadísticamente las variaciones hidrológicas de cada año (The Nature Conservancy, 2009).

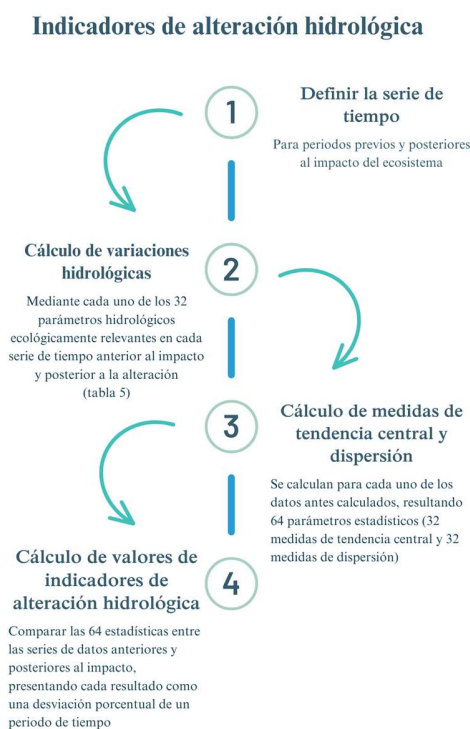


Ilustración 13 Indicadores de alteración hidrológica

Tabla 5 Parámetros hidrológicos utilizados en los Indicadores de Alteración Hidrológica (Richter, 1996)

Grupo de Indicadores Hidrológicos	Características del régimen	Parámetros hidrológicos
Grupo 1: Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Magnitud de tiempo	Valor medio de cada mes



Continuación

Grupo de Indicadores Hidrológicos	Características del régimen	Parámetros hidrológicos
Grupo 2: Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas del agua	Magnitud de duración	Mínimo anual 1-día medio Máximo anual 1-día medio Mínimo anual 3-día medio Máximo anual 3-día medio Mínimo anual 7- día medio Máximo anual 7-día medio Mínimo anual 30-día medio Máximo anual 30-día medio Mínimo anual 90-día medio Máximo anual 90-día medio
Grupo 3: Momento de las condiciones extremas anual del agua	Tiempo	Fecha juliana de cada año, máximo 1 día Fecha juliana de cada año, mínimo 1 día
Grupo 4: Frecuencia y duración de pulsos altos y bajos	Magnitud de frecuencia y duración	No. de pulsos altos de cada año No. de pulsos bajos de cada año
Grupo 5: Velocidad y frecuencia de los cambios en las condiciones hidrológicas	Frecuencia Tasa de cambio	Medias de todas las diferencias positivas entre medias diarias consecutivas Medias de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos No. de subidas No. de bajadas

Los datos que se usan para estimar los valores de los atributos son las condiciones medias diarias del agua (niveles, alturas, caudales).

El método IHA proporciona estadísticas hidrológicas que son comúnmente empleadas en estudios de limnología; por su gran relevancia ecológica, de los 32 parámetros, 16 de ellos son características hidrológicas que se centran en la magnitud y duración (n y frecuencia de los eventos extremos debido a la influencia generalizada de fuerzas extremas en los ecosistemas), los otros 16 parámetros miden la tendencia central de la magnitud o la tasa de cambio de las condiciones del agua (Richter, 1996). Estos 32 parámetros se basan en cinco grupos para caracterizar estadísticamente la variación intraanual los regímenes hidrológicos (The Nature Conservancy, 2009):

- Magnitud de la condición de agua: es una medida de la disponibilidad del hábitat, define atributos como el área húmeda, el volumen del hábitat, la posición de un nivel freático en relación con los humedales o zonas ribereñas En este grupo se incluyen 12 parámetros, cada uno de ellos mide la tendencia central de las condiciones diarias del agua para un mes determinado. La media mensual de las condiciones diarias de agua describe las condiciones diarias para el mes y, por lo tanto, proporciona una medida general de disponibilidad.
- Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales: 10 parámetros de este grupo miden la magnitud de las condiciones extremas (máximas y mínimas) anuales del agua de distinta duración.



- Momento en que ocurren las condiciones extremas anual del agua: puede indicar si influye en las condiciones extremas del agua como inundaciones o sequías. Mide la fecha juliana de la condición mínima anual de agua de un día y el otro mide la fecha juliana de la condición máxima de agua de un día. Esta fase está relacionada con el ciclo de vida, ya que los cambios en el momento inducidos por el hombre pueden causar fallas reproductivas, estrés o mortalidad, una variación interanual en el momento en que ocurren los eventos extremos refleja la contingencia ambiental.
- Frecuencia de ocurrencia de las condiciones de agua y duración de pulsos altos y bajos: se relaciona a eventos de reproducción o mortalidad para las especies, influyendo en la dinámica de la población. Incluyen 4 parámetros, 2 parámetros miden el número de ocurrencias anuales durante las cuales la magnitud de la condición del agua excede un umbral o permanece por debajo y los otros 2 parámetros miden la duración media de dichos niveles altos y bajos; La duración es el tiempo en el cual una condición específica puede presentarse. Estas son medidas de las condiciones de los niveles, representan el comportamiento pulsante de la variación ambiental dentro de un año y proporcionan medidas. Los pulsos hidrológicos se definen como aquellos periodos dentro de un año en los que la condición media diaria del agua aumenta por encima del percentil 75 (pulso alto) o cae por debajo del percentil 25 (pulso bajo) de todos los valores diarios para el periodo previo al impacto.
- Tasa y frecuencia de cambio de condiciones: se relaciona con la variación de ciertos organismos para mantener contacto con los suministros de agua freática. Incluye 4 parámetros que miden el número y la tasa media de cambios positivos y negativos.

Si la corriente en cuestión se encuentra alterada, es necesario implementar algún tipo de acción con la finalidad de mejorar las condiciones del régimen hidrológico. En este sentido, el método Enfoque de Rango de Variabilidad (RVA) permite establecer metas basadas en los valores mínimos y máximos de cada parámetro en el método IHA, con el propósito de formular políticas de operación y lograr una gestión sostenible. En otras palabras, su objetivo es alcanzar las condiciones y con la misma frecuencia con que se presentaba el régimen de flujo natural previo al desarrollo (Richter, 1997).

Richter (1998) menciona que los cálculos para el método RVA se basan en datos hidrológicos recopilados en un punto, midiendo solo la alteración hidrológica en una dimensión temporal en ese punto.

1.8. Consecuencias de la alteración ambiental y del régimen de flujo

La norma NMX-AA-159-SCFI-2012 destaca que la alteración hidrológica se refiere a la modificación inducida de la calidad, cantidad y temporalidad de los regímenes hidrológicos, siendo ocasionada principalmente por la infraestructura hidráulica (ilustración 14), vial y urbana. Esta modificación impacta significativamente la provisión de servicios ambientales.

La alteración hidrológica en los ríos va más allá de simplemente modificar sus características; implica consecuencias directas en los recursos naturales, por lo que es importante investigar a fondo estas alteraciones y su influencia tanto en el entorno ecológico y en la sociedad.

Para identificar las consecuencias de la alteración en la cuenca se requiere un análisis detallado de diversos aspectos, entre ellos, observar los impactos en el comportamiento de la población y su calidad de vida, el uso y aprovechamiento de la tierra, la degradación del suelo, eventos catastróficos como la erosión, deforestación, inundaciones, cambios en la temperatura y precipitación, así como la oferta y demanda de agua en términos de calidad y cantidad (Gonzalez, 2016).



Ilustración 14 Presa Valle de Bravo en su nivel más bajo (Agua.org.mx)

Este tipo de análisis se dirigen hacia una visión de la situación actual y conocer el origen para definir soluciones efectivas.

La alteración del régimen de flujo en los ríos afecta a cuatro aspectos fundamentales de la biodiversidad de las corrientes, como señala Ward y Tockner (2001):

- Alteración en las condiciones del hábitat y la composición biótica.
La alteración de los cuerpos de agua impacta significativamente tanto a la vegetación acuática como a la fauna debido a los cambios en diversas condiciones ambientales, como la velocidad, la profundidad y la temperatura. Estos cambios influyen negativamente en la supervivencia y el crecimiento de las plantas acuáticas, así como en la capacidad de especies para adaptarse a las nuevas condiciones (ilustración 15). Como resultado, los patrones de crecimiento de las especies ribereñas también se ven afectados, lo que puede llevar a una disminución en la biodiversidad y la alteración de los ecosistemas acuáticos (Gonzales, 2016).



Ilustración 15 Presa Valle de Calderón, Jalisco. 16 de abril 2020 (izq.) y 21 de abril 2021 (der.) (Planet Labs, 2021)

Alteración en las estrategias de vida de las especies.

La construcción de estructuras hidráulicas provoca alteraciones en las condiciones del hábitat y la composición biótica, lo que conlleva cambios significativos en las estrategias de vida de las especies. La transformación del hábitat de las especies acuáticas es una de las principales causas de pérdida de biodiversidad (ilustración 16), ya que modifica los patrones de supervivencia y su ciclo de vida. Estos cambios limitan los recursos disponibles, dificultando el crecimiento y la reproducción de las especies. Así, la transformación del hábitat es un factor crucial en la disminución de la biodiversidad (Gonzales, 2016).

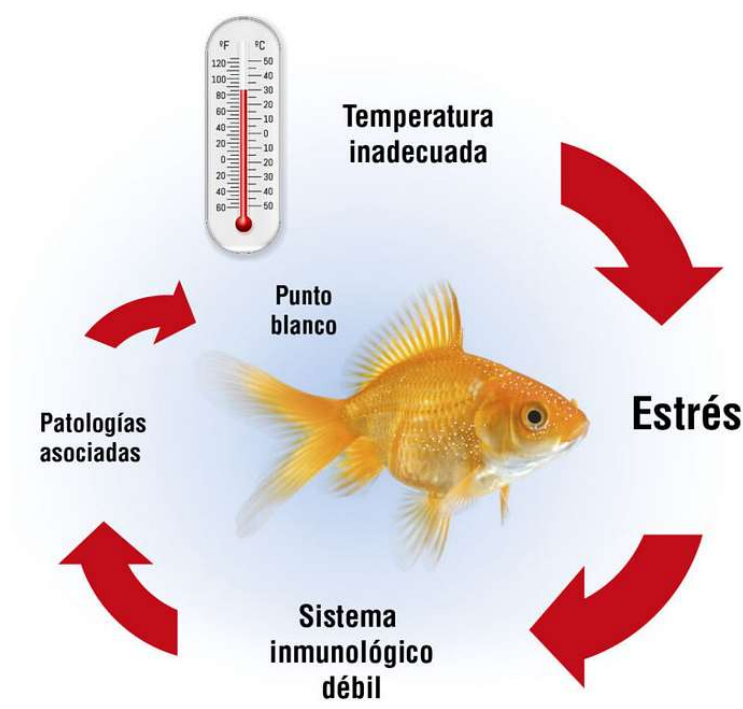


Ilustración 16 La temperatura, factor ambiental que afecta a la fauna acuática (ideas marinas, 2020)

- Alteración de patrones naturales de conectividad longitudinal y lateral de las riberas.
El Fondo Mundial para la Naturaleza (2024) destaca la importancia de mantener el flujo libre de los ríos cuando su conectividad es poco alterada o no ha sido alterada. Los ríos que fluyen libremente son importantes para la supervivencia tanto de las personas como de una gran cantidad de animales. La infraestructura hidráulica es la principal responsable de alterar su conectividad.

La conectividad longitudinal se refiere a la capacidad de las especies acuáticas para moverse a través de la red fluvial, lo cual tiene un gran impacto en la migración de estas especies. Por otro lado, la conectividad lateral se refiere a la alteración de las trayectorias de sucesión de las especies, lo que compromete la diversidad de especies y su integridad ecológica.

- Introducción e invasión de especies exóticas a los ríos.

Las especies exóticas se conocen como plagas que tienden a ser perjudiciales, estas especies aprovechan los flujos de agua alterados debido a que toleran las condiciones del hábitat, mientras las especies nativas comienzan a ser desplazadas por la falta de recursos y no llegan a ser suficientes para las especies. Mar Silva, et al. (2021) menciona que las especies exóticas provocan impactos desde su introducción, hasta su reproducción (ilustración 17).

Se le conoce como intercambio biótico al fenómeno de reemplazo debido a que existe pérdida de especies por el factor humano combinado con la introducción de especies exóticas (Gonzales, 2016).



Ilustración 17 Invasión de pez diablo en la presa Don Martín (Conanp, 2020)



II. Zona de estudio: Cuenca del Río Culiacán

Este trabajo forma parte del proyecto titulado “Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California desde la fuente hasta el mar”. El proyecto se centra en un área de estudio compuesta por 30 cuencas que descargan al Golfo de California, el cual cuenta con una superficie de 394,985 km².

El Golfo de California, también conocido como Mar de Cortés o Mar Bermejo, se localiza en el noroeste del territorio mexicano y está delimitado por la península de Baja California y los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit. También lo integran estados de desembocadura indirecta como Chihuahua, Durango y Zacatecas (ilustración 18). El área de estudio cuenta con varios ríos importantes que desembocan al Golfo de California, y que son aprovechados en la región, algunos son: Culiacán, Yaqui, El Fuerte, Sonora, Altar Concepción y Mayo.

En esta sección se llevará a cabo un análisis específico de una de dichas cuencas, la Cuenca del Río Culiacán, cuyo río destaca por su longitud ya que figura entre los principales del país.

2.1. Localización

La cuenca hidrológica del Río Culiacán se delimitó con Sistemas de Información Geográfica y abarca los estados de Sinaloa, Durango y una parte de Chihuahua; forma parte de la región hidrológica RH10 y de la Región hidrológica-administrativa III Pacífico Norte. Limita con las cuencas Río Mocorito, Río Sinaloa, Río Fuerte al norte y Río San Lorenzo al sur (ilustración 18).

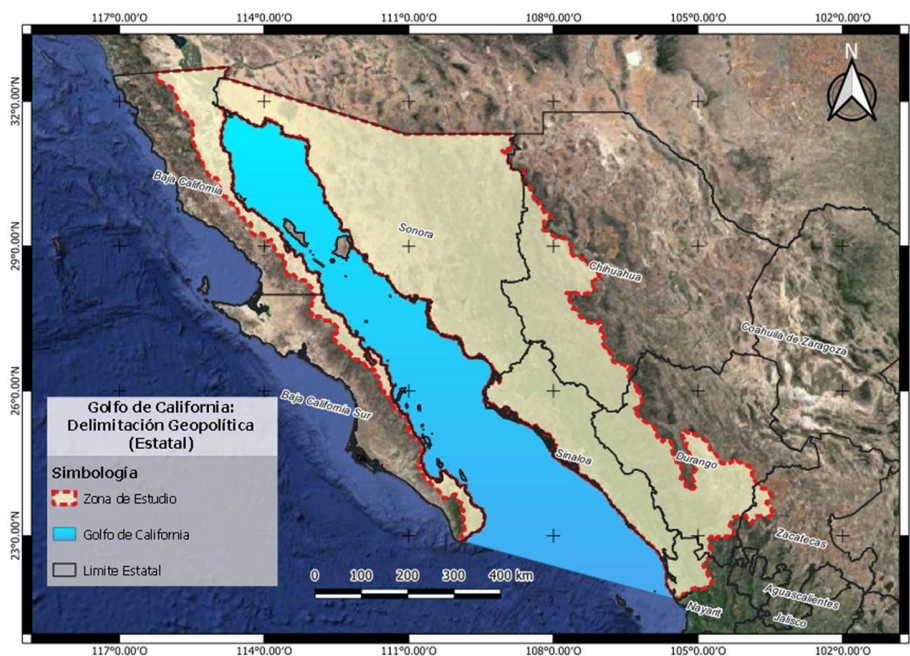


Ilustración 18 Delimitación geográfica del Golfo de California (Morales, 2023)

Muchos de los problemas de impacto ambiental en la región están relacionados con el crecimiento urbano, las actividades desarrolladas en la zona y la falta de un marco regulatorio. Estos factores han ocasionado la alteración de los ríos debido a la infraestructura, la contaminación de las aguas subterráneas, el aumento de contaminantes vertidos en los cuerpos de agua, la sedimentación debido a la deforestación y la erosión del suelo.

La cuenca se compone de tres ríos principales, siendo el Río Culiacán el más importante, el cual se origina en la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula (ilustración 19).

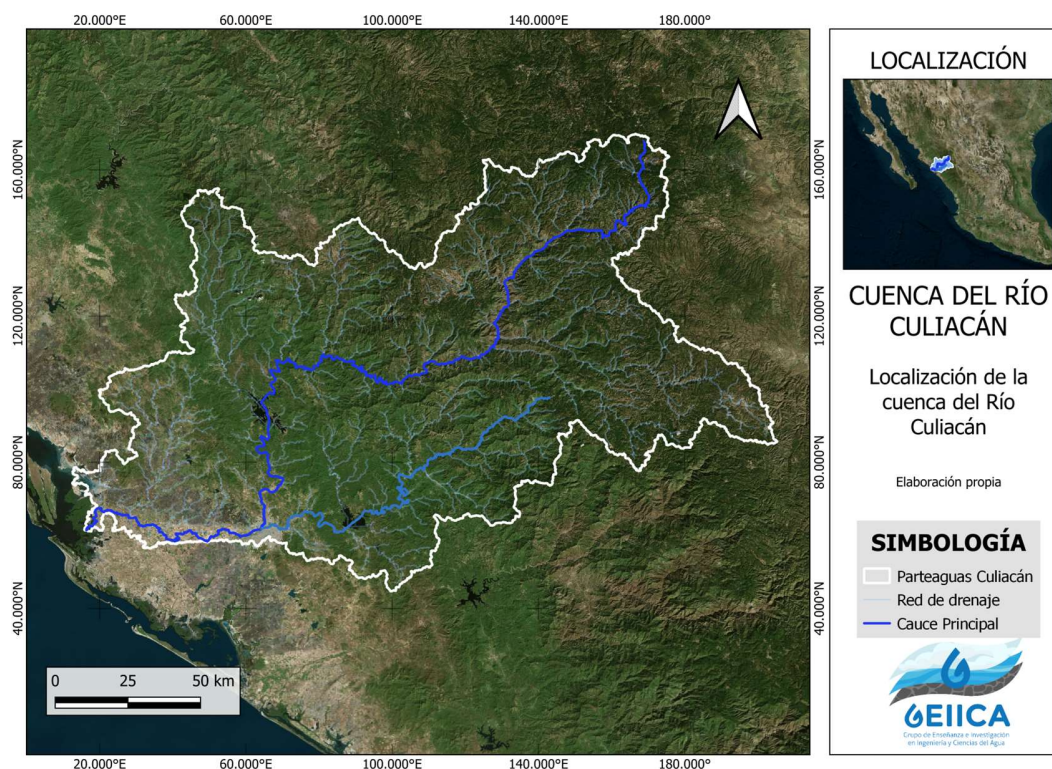


Ilustración 19 Localización de la cuenca del Río Culiacán

La cuenca del Río Culiacán abarca los siguientes municipios (ilustración 20 y tabla 6).

Tabla 6 Municipios en la cuenca del Río Culiacán

Estado	Municipio	Área [km ²]	Área [%]
Chihuahua	Guadalupe y Calvo	920.27	5.08
Durango	Tepehuanes	2,783.84	15.36
Durango	Topía	1,627.65	8.98
Durango	Canelas	684.53	3.78
Durango	Tamazula	3,154.07	17.41
Durango	Guanaceví	1,003.31	5.54
Durango	Santiago Papasquiaro	59.14	0.33
Sinaloa	Badiraguato	3,230.40	17.83
Sinaloa	Culiacán	2,821.51	15.57

Continuación

Estado	Municipio	Área [km ²]	Área [%]
Sinaloa	Mocorito	1,018.10	5.62
Sinaloa	Navolato	638.24	3.52
Sinaloa	Cosalá	151.50	0.84
Sinaloa	Salvador Alvarado	13.68	0.08
Sinaloa	Angostura	13.97	0.08

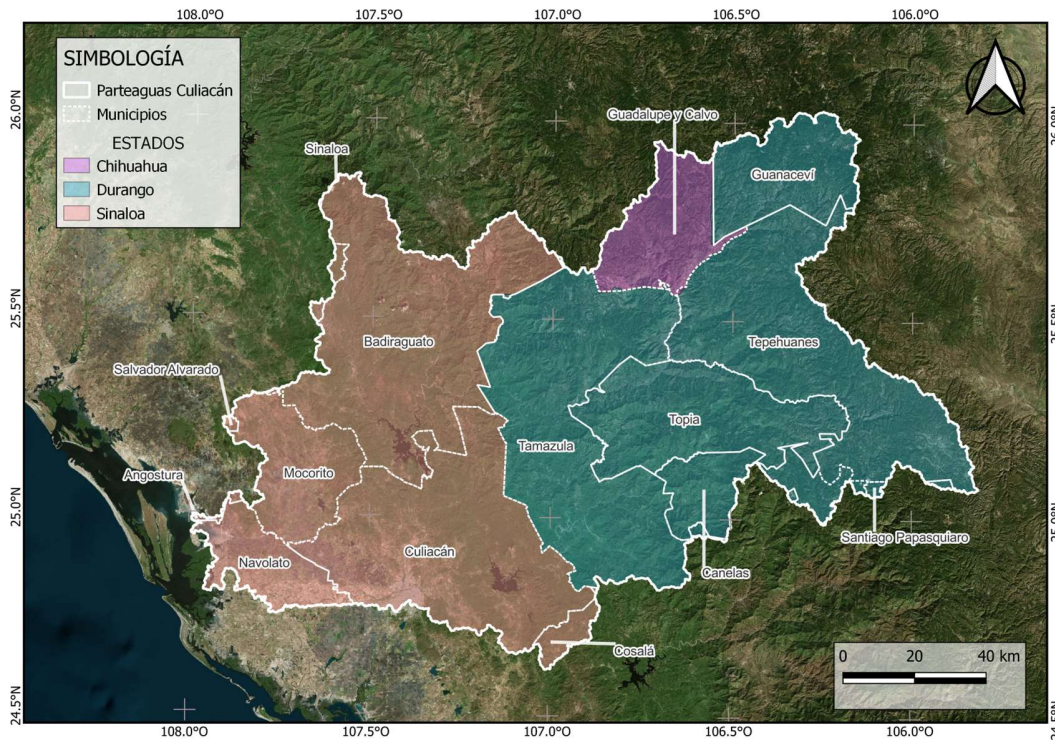


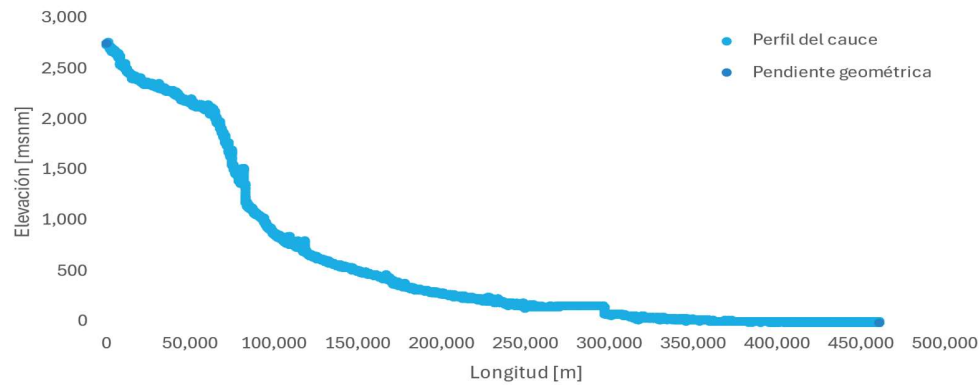
Ilustración 20 Delimitación geopolítica en la cuenca del Río Culiacán

2.2. Características generales

En la cuenca del Río Culiacán, la zona de mayor altitud se encuentra en una sección de la imponente Sierra Madre Occidental, uno de los sistemas montañosos más significativos de México. La Sierra desempeña un papel importante como recolector de agua, ya que sus ríos fluyen desde las elevaciones más altas hacia las elevaciones bajas de Sinaloa, el camino que recorre el agua es importante para el cultivo de la tierra, siendo aprovechada de manera óptima gracias a la construcción de las grandes presas.

La cuenca tiene un área de 18,121.18 km² (por su extensión la cuenca se clasifica como muy grande), perímetro de 1,352.95 km, longitud y pendiente del cauce principal de 461 km y 0.00598 m/m (gráfica 1). La altitud máxima alcanza los 3,162 msnm en los estados de Chihuahua y Durango, mientras que en la zona costera del estado de Sinaloa se encuentra la altitud mínima, que es de 3

msnm (ilustración 21). Esta cuenca se clasifica como exorreica, ya que sus ríos desembocan directamente en el mar.



Gráfica 1 Pendiente del cauce principal

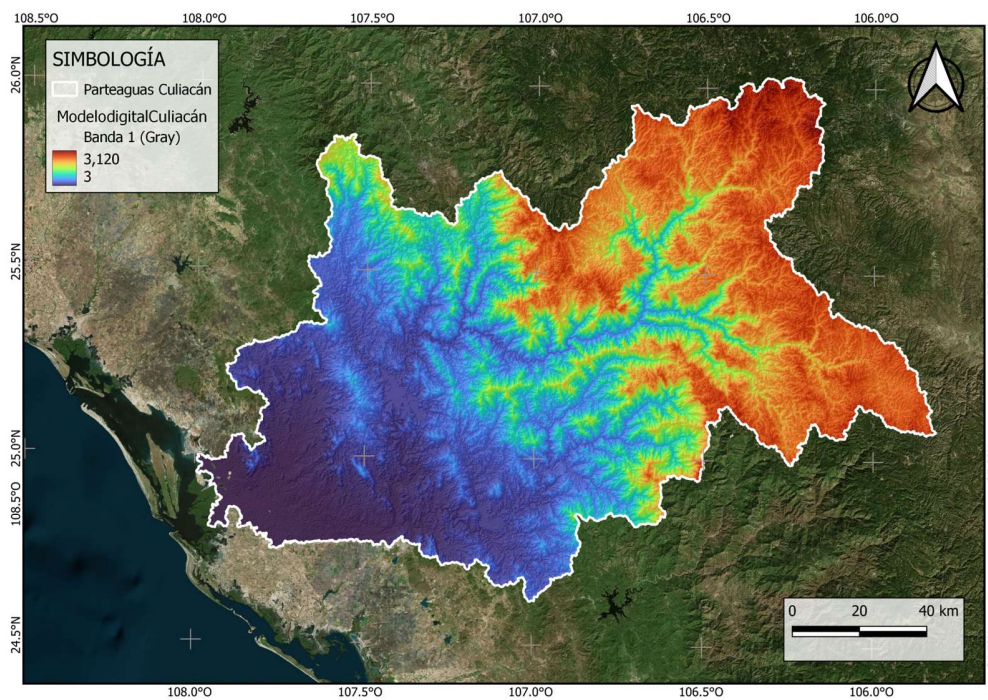


Ilustración 21 Topografía de la cuenca del Río Culiacán (INEGI)

2.2.1. Aspectos climatológicos

De acuerdo con el INEGI (2005), el clima se divide en seis categorías principales, cada una con sus propias subcategorías y variaciones regionales. Estas categorías incluyen:

- 🔹 Clima cálido: caracterizado por altas temperaturas durante todo el año. En esta categoría se encuentran subcategorías como el clima cálido subhúmedo y el clima tropical.

- Cima seco: En este tipo de clima la escasez de lluvia es evidente, existen áreas dentro de esta categoría que son desiertos.
- Clima templado: Tiene estaciones bien definidas, tiene subcategorías como el clima templado subhúmedo.
- Clima frío: Las temperaturas son bajas durante la mayor parte de año.
- Clima semifrío: Se caracteriza por temperaturas moderadamente frías, pero no tan altas como los climas fríos.
- Clima tropical: Tiene temperaturas cálidas y altos niveles de precipitación.

En la cuenca del Río Culiacán, predominan los climas cálidos subhúmedos y semiáridos cálidos (ilustración 22). En la parte baja de la cuenca, el clima es cálido subhúmedo, con una temperatura media anual superior a 22°C y una temperatura del mes más frío mayor a 18°C. La precipitación en el mes más seco varía entre 0 y 60 mm. Por otro lado, en la parte alta de la cuenca, el clima es semifrío, con un verano fresco y una temperatura media anual entre 5°C y 12°C. La temperatura del mes más frío varía entre 3°C y 18°C, mientras que en el mes más cálido se mantiene por debajo de 22°C. En la parte central de la cuenca predominan los climas templados subhúmedos, con una temperatura media anual de 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío oscila entre -3°C y 18°C y la del mes más cálido se mantiene por debajo de los 22°C. Finalmente, en la parte más baja de la cuenca, el clima es árido y cálido, con una temperatura superior a 22°C y una temperatura del mes más frío mayor a 18°C (CONABIO, 2001).

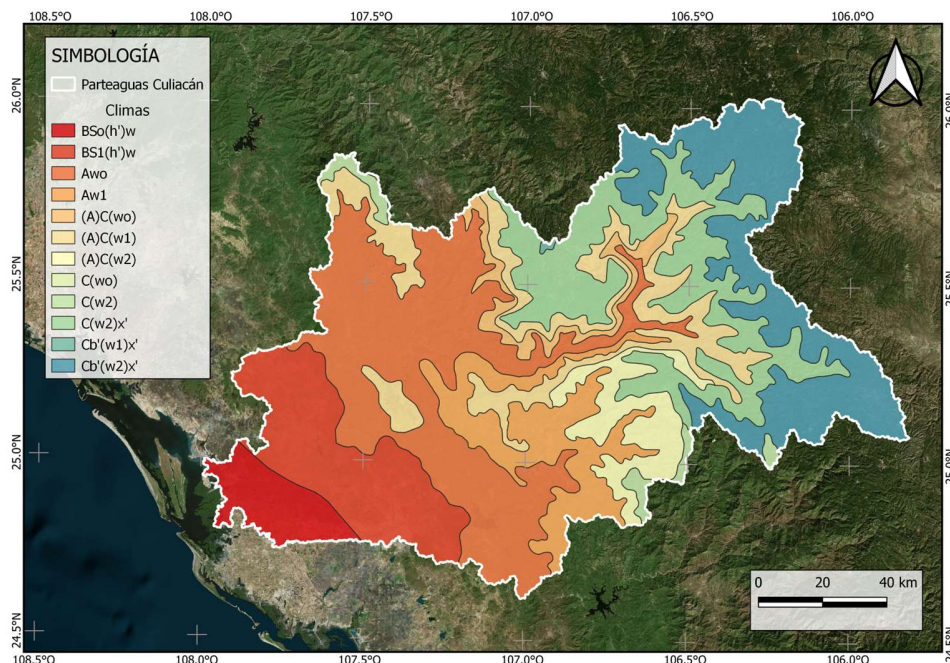


Ilustración 22 Climas en la cuenca del Río Culiacán

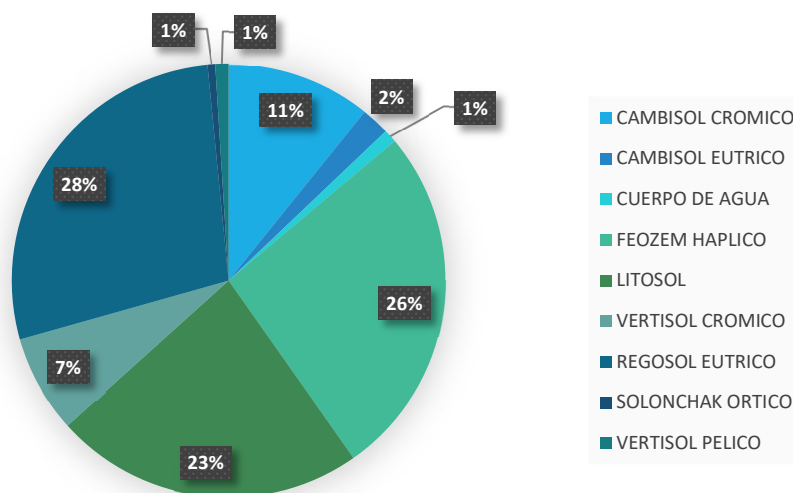
2.2.2. Tipo de suelo

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la clasificación de suelos se basa en criterios edafológicos (composición del suelo) y geomorfológicos (formas y estructura de la tierra).

Así, en la cuenca del Río Culiacán predominan principalmente los suelos tipo regosol eútrico (ilustración 23). El regosol eútrico se caracteriza por ser uno de los suelos con mayor representación de extensión en México, que se encuentran ubicados en diversos tipos de clima, vegetación y relieve, estos suelos se caracterizan por ser jóvenes y poco desarrollados y con poca capacidad de retención de agua (SEMARNAT, 2002). En la cuenca del Río Culiacán se encuentran en las zonas alta, media y baja de la cuenca, constituyendo un 28% de su área total (gráfica 2).

Otro suelo que predomina en la cuenca del Río Culiacán son los suelos feozem haplico en la zona alta de la cuenca y menor en la zona baja, contribuyendo con un 26% del total del área (gráfica 2) y son suelos que se caracterizan por ser suelos fértiles y aptos para los cultivos y se desarrollan en los climas templados y húmedos (SEMARNAT, 2002)

En la cuenca del Río Culiacán predomina el tipo de suelo Litosol, siendo uno de los tipos más abundante en el país, significa suelo de piedra. Sus usos principales dependen de la vegetación que se encuentre en el lugar. Es distribuido en la parte más alta de la cuenca con una vegetación constituida por vegetación inducida, bosque pino-encino y selva baja caducifolia, contribuyendo con el 23% del área total de la cuenca, se encuentran mayormente entre la zona alta y media de la cuenca.



Gráfica 2 Porcentaje de distribución edafológica en la cuenca del Río Culiacán

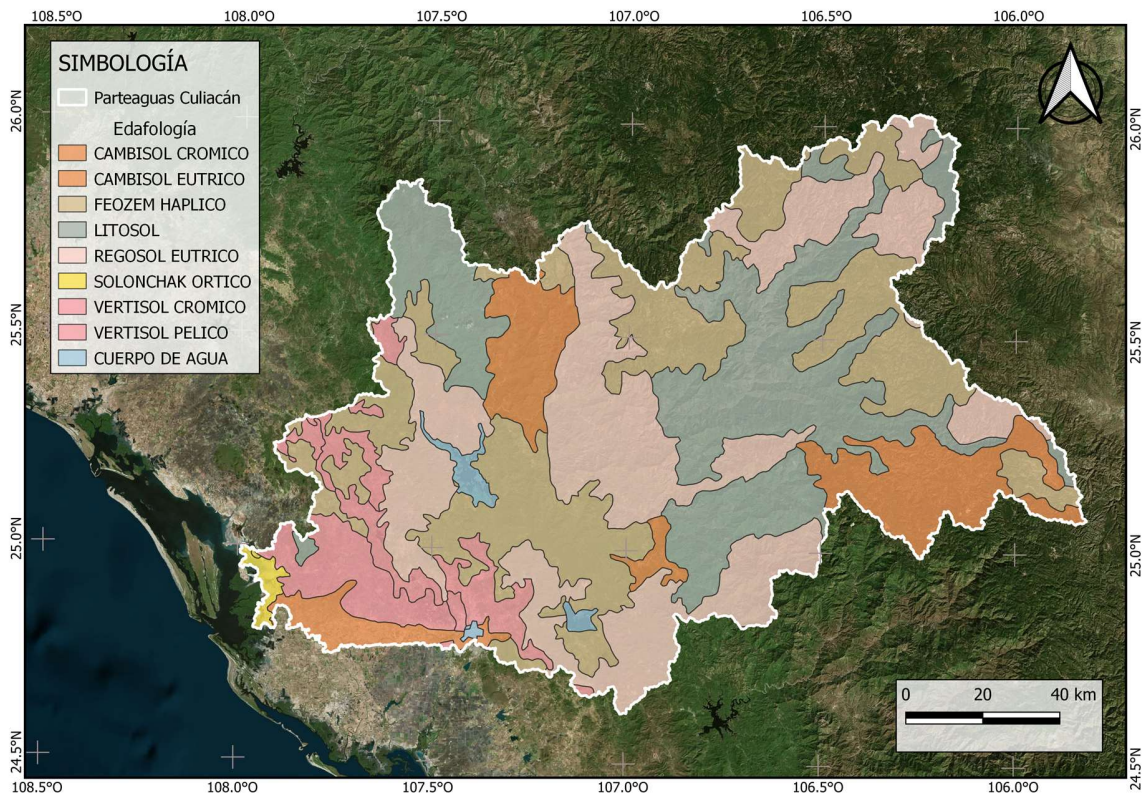


Ilustración 23 Edafología en la cuenca del Río Culiacán

2.2.3. Uso de suelo y vegetación

Para determinar la cobertura predominante, se utilizó la carta de uso de suelos serie VI. La cuenca del Río Culiacán destaca por la existencia de vegetación de selvas, cubriendo el 55% del área de estudio. En las zonas medias y bajas de la cuenca, la vegetación de bosques ocupa el 24% de su extensión. Asimismo, en las áreas más bajas de la cuenca, se observa una mayor diversificación en el uso de suelo, siendo los cultivos predominantes que ocupan el 18% del área total de estudio, distribuidos de forma dispersa a lo largo de la cuenca. Es importante destacar que la cuenca del Río Culiacán presenta usos de suelo significativos, entre los que se destacan las áreas urbanas, ocupando el 1%, este dato es relevante porque el uso de suelo puede tener un impacto significativo, ya que las áreas urbanas suelen ser generadoras de desechos contaminantes en los cuerpos de agua y alteran el hábitat natural de las zonas ribereñas, también alteran el ciclo hidrológico al modificar los patrones de precipitación, evaporación, transpiración y filtración de la lluvia afectando en la disponibilidad de agua. El 2% restante corresponde a la presencia de vegetación hidrófila y cuerpos de agua, desprovisto de vegetación y vegetación inducida, completando así el panorama de la cobertura terrestre en esta región (ilustración 24).

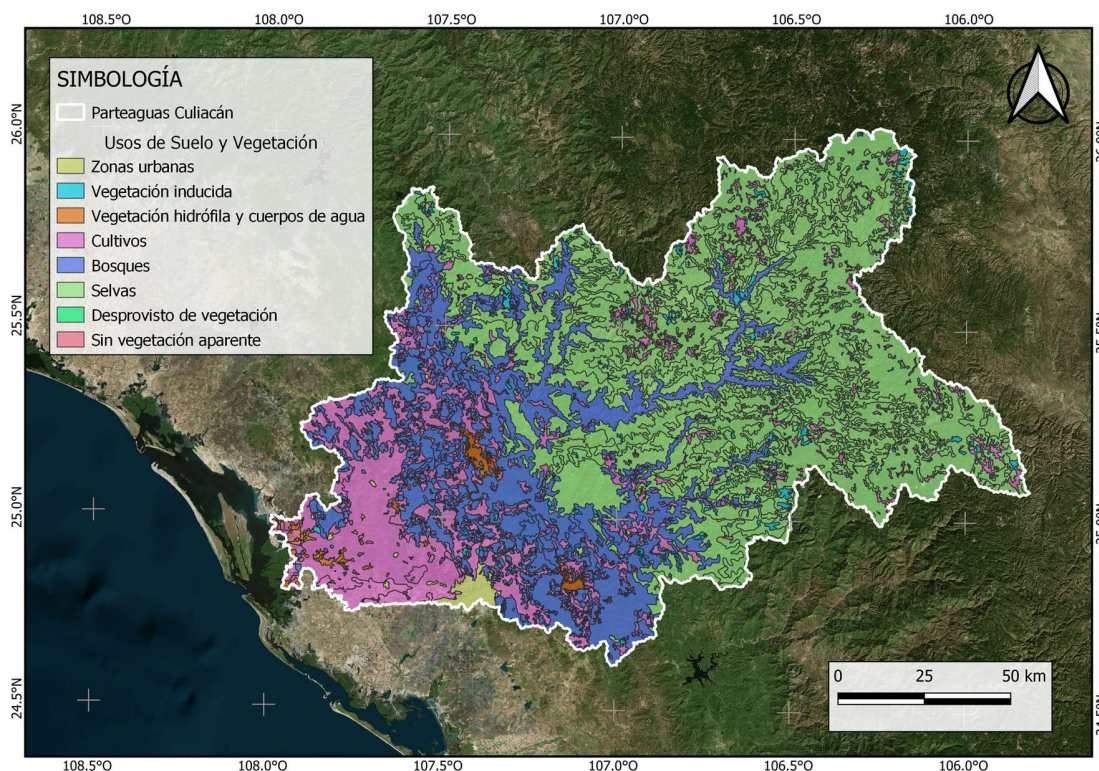


Ilustración 24 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del Río Culiacán

2.2.4. Zonas de importancia ecológica

En las cuencas hidrográficas es importante enfatizar que se relacionan directamente con los procesos ecológicos, esto quiere decir que los cambios o alteraciones pueden afectar significativamente la zona de estudio. Las zonas de importancia ecológica en la cuenca del Río Culiacán son las siguientes:

Disponibilidad de acuíferos

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2024), con los estudios sobre las características físicas del suelo, así como el comportamiento del agua subterránea, se determinó que el acuífero del Río Culiacán, con extensión similar a la cuenca del mismo nombre, es de tipo libre; se compone por una mezcla de materiales que incluyen sedimentos transportados por el agua y viento y conglomerados de distintas rocas.

El acuífero del Río Culiacán se encuentra sin disponibilidad, con un déficit de 39.7 hm³ (ilustración 25). Además de acuerdo con el análisis de resultados, se identificó la presencia de contaminación en zonas agrícolas debido al uso de fertilizantes y agroquímicos, la descarga de aguas residuales y actividades pecuarias.

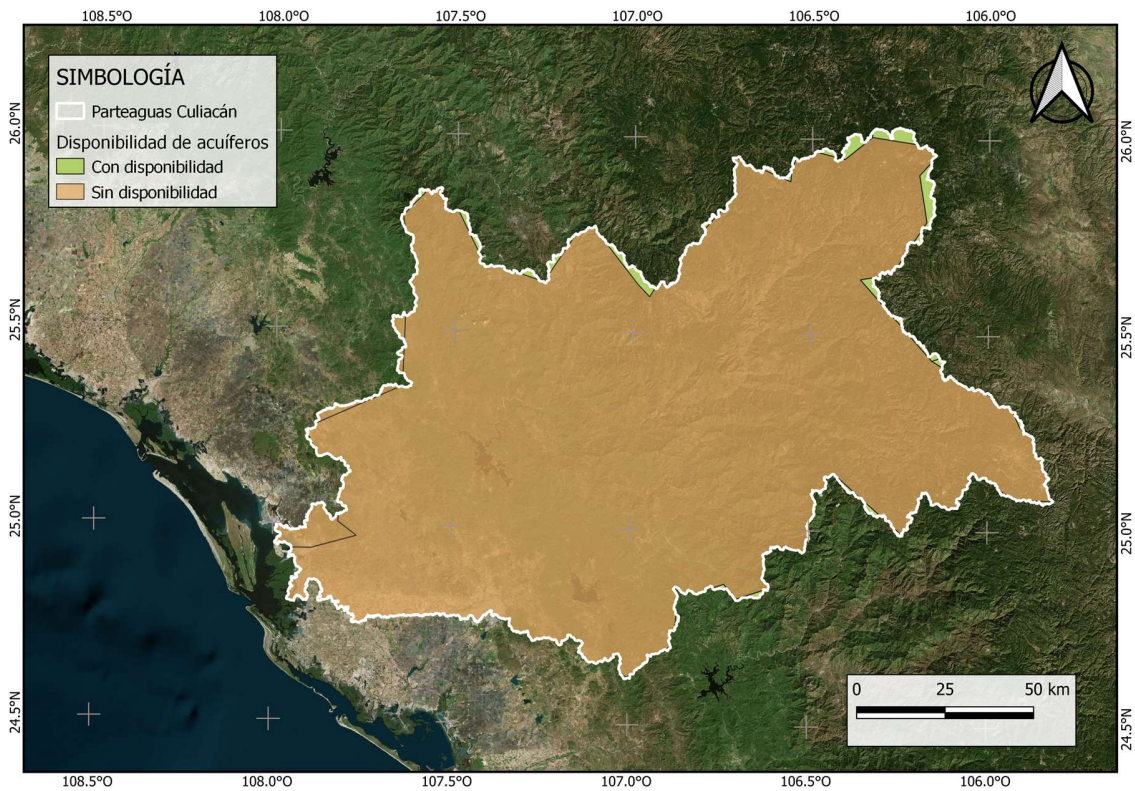


Ilustración 25 Disponibilidad en el acuífero del Río Culiacán

Humedales

De acuerdo con INEGI (2024), la cuenca del Río Culiacán presenta zonas con humedales potenciales (ilustración 26). Según el sistema de clasificación para los humedales en México, se identifican varias subclases, entre las cuales destacan los embalses formados por las presas Adolfo López Mateos y Sanalona.

Los ríos superficiales permanentes, abarcan ríos como el río Humaya, Las Vueltas, el río Tamazula y el río principal de la cuenca, el Río Culiacán. Además, la cuenca alberga otros tipos de subclases de humedales, tales como los arroyos estacionales, charcas, lagos, lagunas costeras, llanuras húmedas, marismas y montañas húmedas.

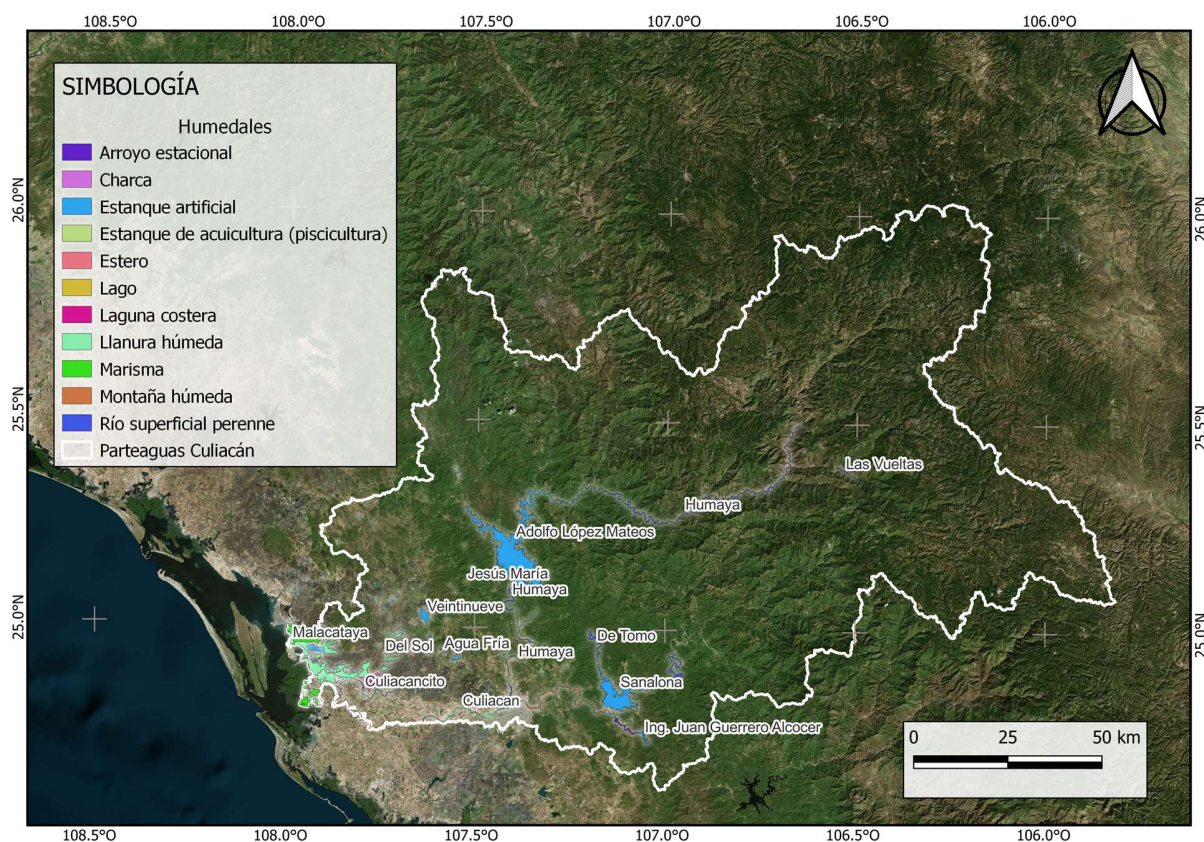


Ilustración 26 Humedales potenciales en la cuenca del Río Culiacán

Región Hidrológica Prioritaria

De acuerdo con la CONABIO (2023), en la cuenca del Río Culiacán se identifican dos regiones hidrológicas prioritarias (ilustración 27). Una de ellas es la cuenca alta de los ríos Culiacán y Humaya, que abarcan la mayor parte de la cuenca. Esta región se clasifica como una zona de alta biodiversidad (AAB), una de uso por factores (AU) y una de las regiones amenazadas (AA). La región abarca partes de los estados de Durango y Sinaloa, donde las actividades principales económicas son la forestal, pesquera y acuícola. Las principales problemáticas de la región son la modificación de los ríos debido a la construcción de infraestructura hidráulica, explotación forestal, la construcción de carreteras, desvíos de las corrientes del río y erosión del suelo. Además, existe contaminación en el agua debido al uso excesivo de agroquímicos, desechos humanos y descargas residuales.

La segunda región ubicada en la zona baja de la cuenca corresponde a la Bahía de Ohuira- Ensenada del Pabellón, su principal actividad económica es la agricultura de riego y temporal, acuicultura y el turismo de bajo impacto. Su principal problemática es la modificación del entorno debido a la

agricultura intensiva, la deforestación, construcción de presas, azolvamiento acelerado, contaminación del agua por el uso de agroquímicos, desechos humanos y descargas residuales.

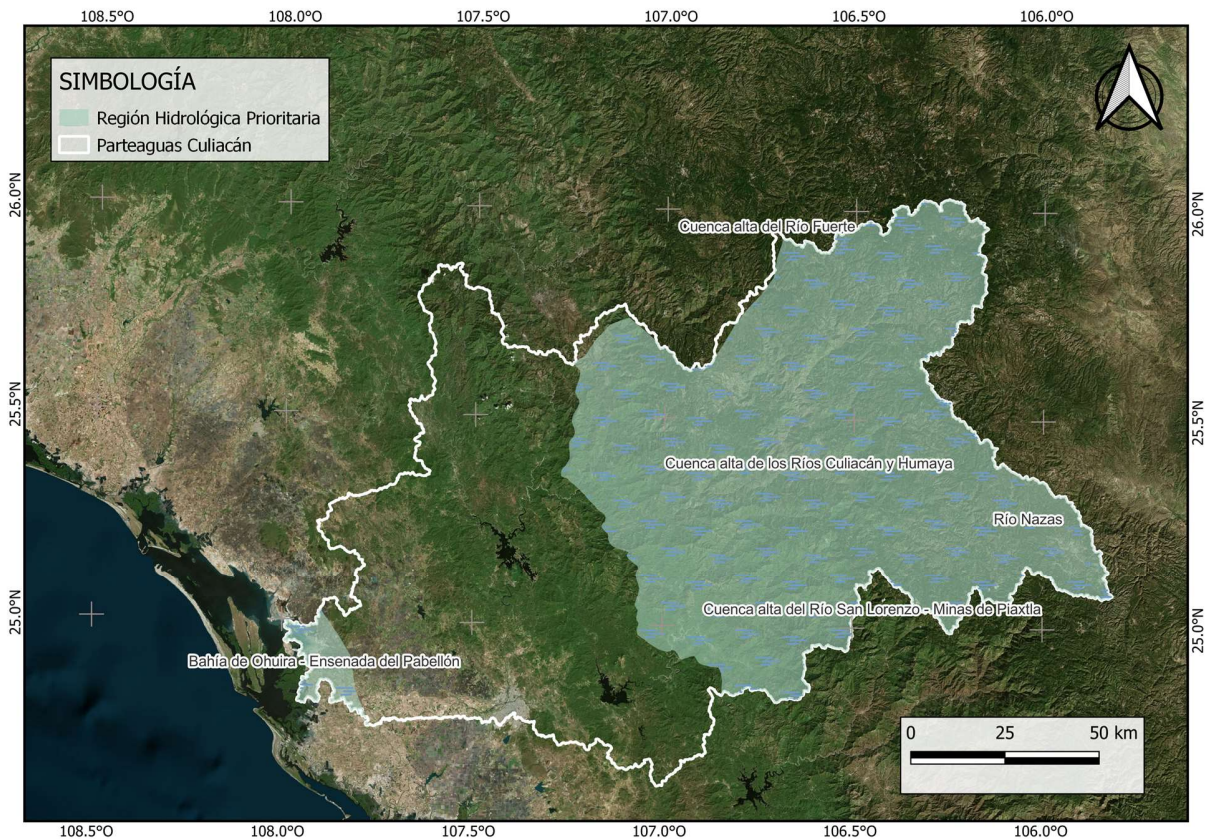


Ilustración 27 Región hidrológica prioritaria en la cuenca del Río Cuiacán

Sitios prioritarios acuáticos para la conservación de la biodiversidad

En la cuenca se identificaron varias zonas acuáticas prioritarias para la conservación de la biodiversidad (ilustración 28). En total, se señalaron 201 hexágonos que requieren estrategias para el mantenimiento de los ecosistemas y el manejo sustentable de estas áreas. Entre ellos, se clasificaron como zonas prioritarias extremas a 13 elementos ubicados entre la costa y los embalses de la presa Sanalona y la presa Adolfo López Mateos. Además, se clasificaron 21 hexágonos como de prioridad alta, distribuidos por las zonas alta, media y baja de la cuenca, y el resto se consideraron de prioridad media, distribuidos por la mayor parte de la cuenca (CONABIO, 2010).

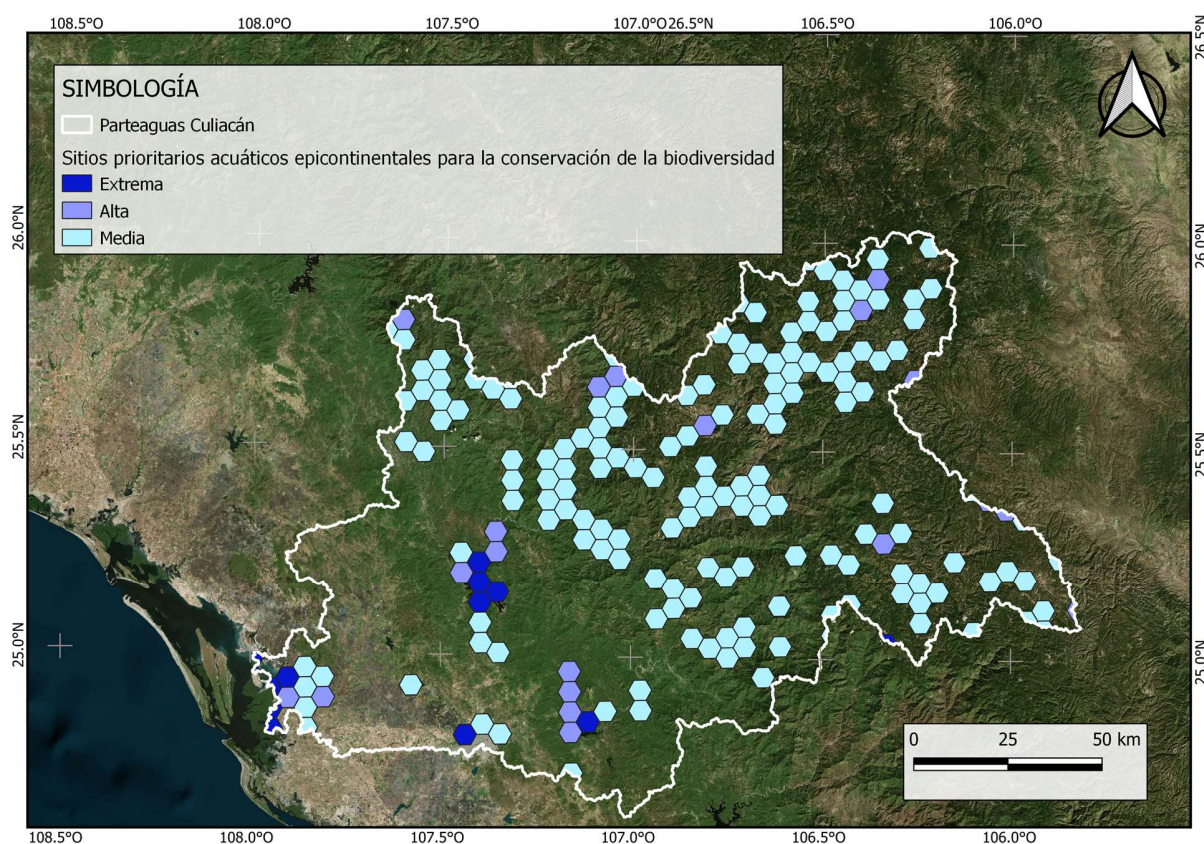


Ilustración 28 Sitios prioritarios acuáticos para la conservación de la biodiversidad en la cuenca del Río Culiacán

Región Terrestre Prioritaria

en la cuenca del Río Culiacán se han identificado algunos polígonos de interés (ilustración 29), uno de ellos es la región del río Humaya, que abarca la zona central de la cuenca. Su principal problemática es la sobreutilización del bosque templado y la acelerada pérdida de la selva debido a actividades forestales sin control adecuado. Las consecuencias incluyen la afectación de felinos por la alteración de su hábitat. Además, no existen políticas de conservación ni presencia de grupos organizados, a pesar de que esta cuenca es importante para la captación de agua esencial para la agricultura (CONABIO, 2023).

Otra de las regiones de importancia es la Marisma Topolobampo-Caimanero ubicada en la zona baja de la cuenca, su problemática principal es la pérdida de agua en pantanos y canales usados para el aprovechamiento agrícola, existe cambios en la calidad de agua y desecación de los manglares, no hay un manejo adecuado en la zona, aunque algunas instituciones realicen actividades de conservación.

Otro polígono de interés corresponde a la región Guadalupe y Calvo-Mohinora, ubicada en la zona alta de la cuenca, su principal problemática ambiental es que tiene un plan de desarrollo forestal que se ejecuta inadecuadamente (CONABIO, 2023).

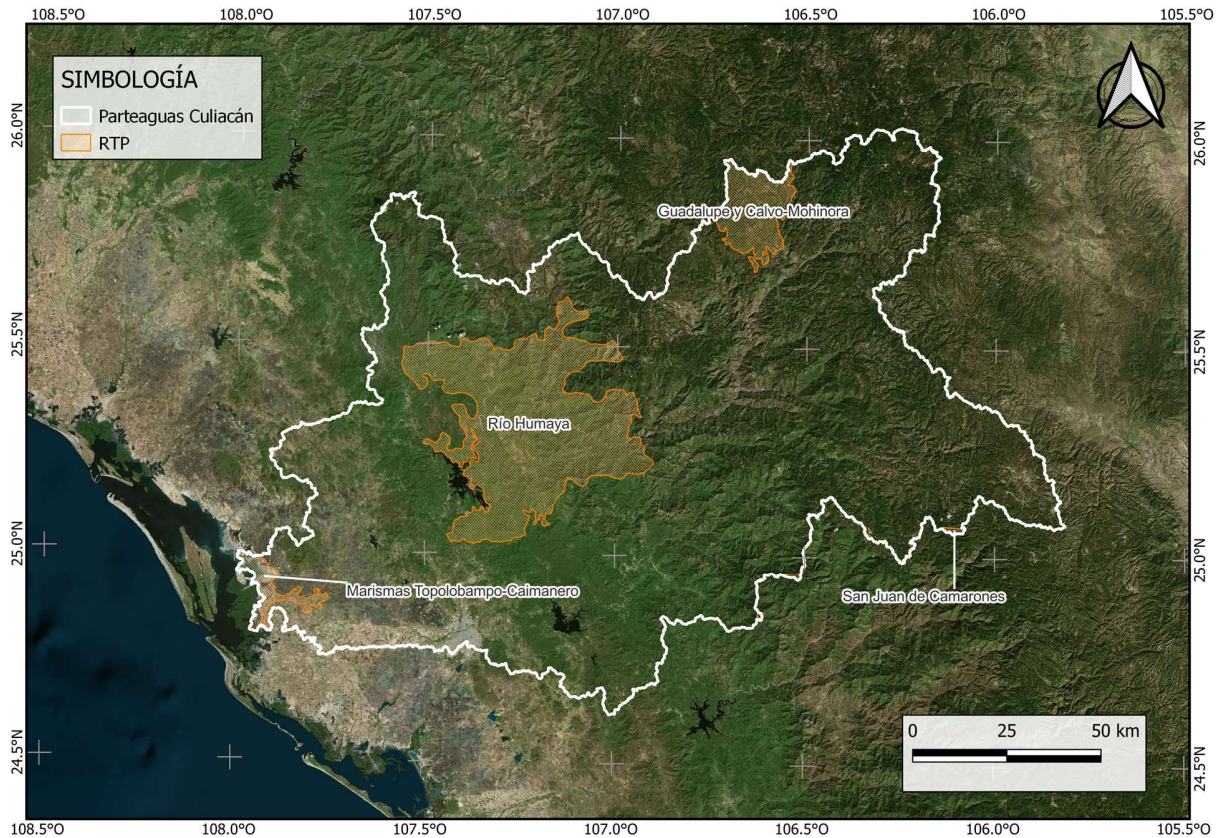


Ilustración 29 Regiones terrestres prioritarias en la cuenca del Río Culiacán

2.2.5. Infraestructura hidráulica

Como cualquier cuenca en la que se desarrollan actividades económicas, la cuenca del Río Culiacán cuenta con infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del recurso hídrico, entre ella, 19 presas, 2 de las cuales corresponde a grandes presas, esto es, $h > 15$ m (ilustración 30) y $V > 3$ hm³ (ilustración 31). En este trabajo se analizará el efecto de las dos grandes presas, las presas Adolfo López Mateos y Sanalona sobre el régimen de flujo.

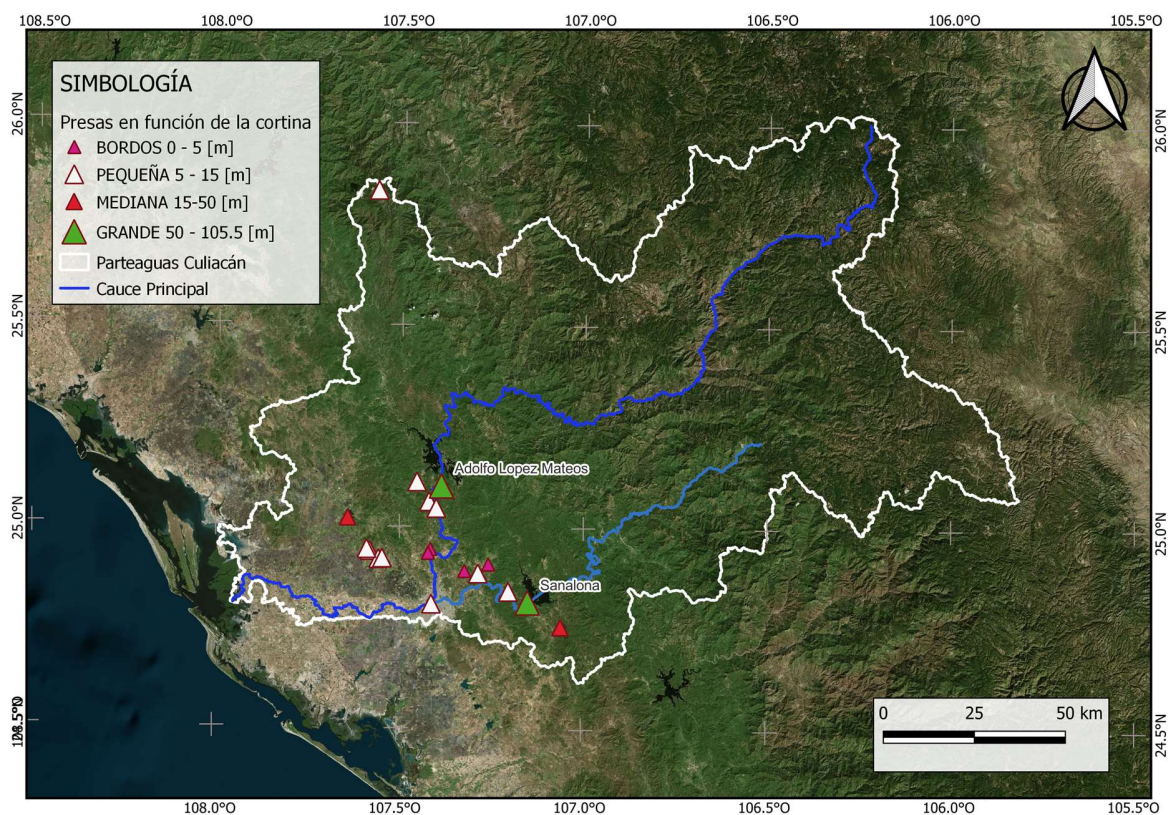


Ilustración 30 Presas en función de altura de cortina en la cuenca del Río Culiacán

La presa Adolfo López Mateos, también conocida como el Varejonal (ilustración 31), es la presa más grande de Sinaloa, se ubica en el cauce del río Humaya en el municipio de Badiraguato. La presa entró en operación el 9 de septiembre de 1963, con el fin de almacenar y controlar las avenidas. La presa tiene una cortina de 105.5 m de altura y 97.50 m desde el lecho del río, almacena 3,086 Hm³, dando lugar a un área de embalse de 11,320 ha a la cresta del vertedor y 12,800 ha al nivel de aguas máximas; los usos principales son el riego (DR 10), generación eléctrica, acuacultura, pesca y recreativo. La cortina es tipo roca, equipada en la margen derecha con una obra de toma y un vertedor de excedencias del tipo abanico, con cresta libre y cimacio de perfil Creager; (Conagua, 2011).

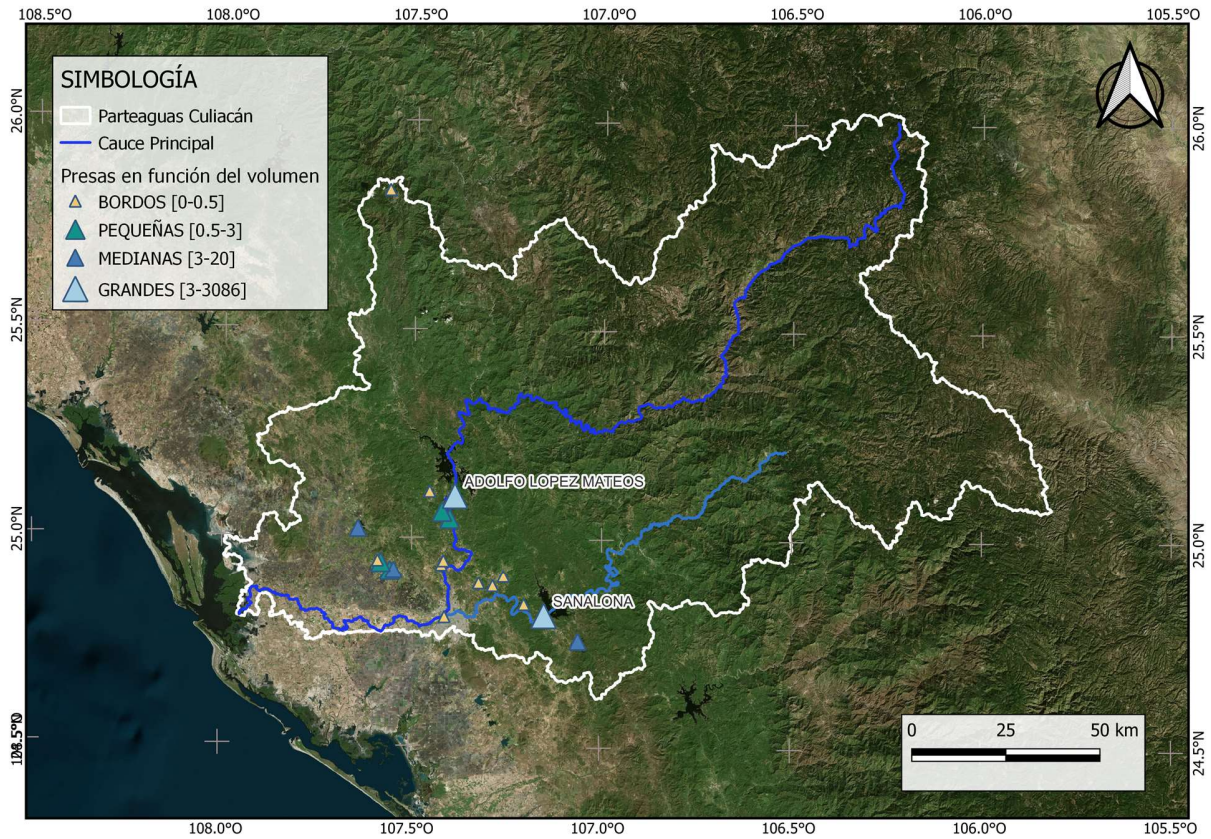


Ilustración 31 Presas en función del almacenamiento en la cuenca del Río Culiacán



Ilustración 32 Presa Adolfo López Mateos (Conagua, 2011)

La presa Sanalona está ubicada en el Río Tamazula a 32 km aguas arriba de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. La presa fue construida con el objetivo de aprovechar el agua del Río Tamazula para actividades como el riego agrícola y la generación de energía eléctrica. La presa tiene una cortina de tierra con una altura de 81 m. En la margen izquierda se localiza la obra de toma, y en la margen derecha, un vertedor de excedencias del tipo abanico (Conagua, 2011) (ilustración 33).

La presa Sanalona entró en servicio en 1949. En 1965, comenzó a utilizarse para el riego y, en mayo de 1962, la planta hidroeléctrica empezó a funcionar. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) aprovechó uno de los túneles y construyó una planta hidroeléctrica con dos unidades, con capacidad instalada de 14 MW. El almacenamiento máximo de la presa es de 845 millones de m³ (Conagua, 2011).



Ilustración 33 Presa Sanalona (CONAGUA,2011)

2.2.6. Usos y disponibilidad del agua

En la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se obtuvo información sobre el uso del agua en la cuenca del Río Culiacán. Esta información incluye permisos y autorizaciones relacionadas con la extracción de agua superficial y subterránea en cada municipio de la cuenca. Para determinar el volumen de agua concesionado dentro de la cuenca, se recopiló el área y volumen total de agua de cada municipio. Luego se determinó el área específica que cada municipio que abarca dentro de la cuenca y se calculó el volumen de agua correspondiente a esta área, basado en la proporción de la cuenca ocupada por el municipio.

En la tabla 7 se muestran los volúmenes más grandes de agua concesionada corresponden a los municipios de Culiacán y Badiraguato, obteniendo la mayor parte de esta agua de fuentes



superficiales. Esto se debe a que en estos dos municipios se encuentran las dos grandes presas que son objeto de estudio.

En el municipio de Culiacán, se ubica la presa Sanalona cuyo principal uso es la generación eléctrica, con una extracción total de 526.5 hm³/año. En el municipio de Badiraguato, se encuentra la presa Adolfo López Mateos, que también se destina principalmente a la generación eléctrica, con una extracción total de 1,279.89 hm³/año. Este volumen representa la mayor parte del agua superficial utilizada en el municipio.

Las concesiones tanto de agua subterránea como superficial son muy importantes para el suministro y uso eficiente de los recursos hídricos en la región, especialmente para los usos en las grandes presas, que es crucial para el desarrollo económico y el bienestar de las comunidades.

Tabla 7 Volumen concesionado en la cuenca del Río Culiacán

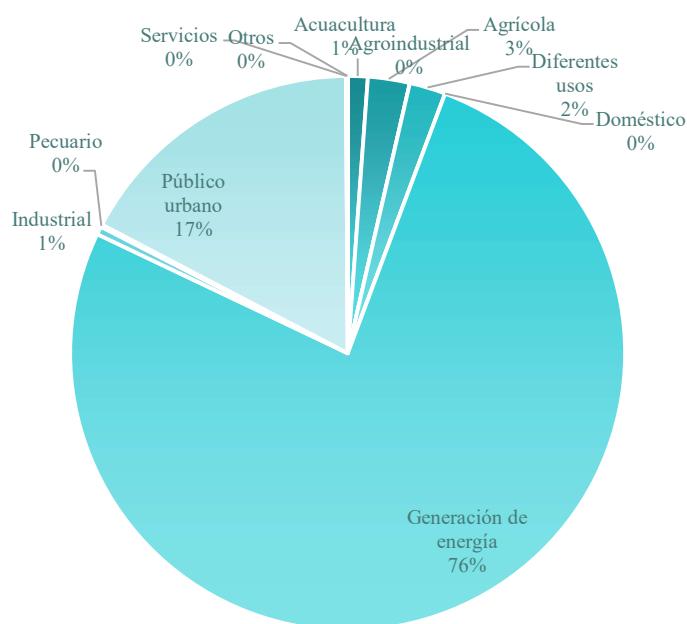
Municipio				Cuenca Río Culiacán				
Municipio	Vtotal	Vsup	Vsub	Amun	A cuenca	Vtotal cuenca	Vsup cuenca	Vsub cuenca
	hm ³	hm ³	hm ³	km ²	km ²	hm ³	hm ³	hm ³
Culiacán	824.9	710.3	114.6	6,308.2	2,821.5	369.0	317.7	51.2
Mocorito	21.9	6.2	15.6	2,803.7	1,018.1	7.9	2.3	5.7
Navolato	60.8	12.1	48.7	2,333.3	638.2	16.6	3.3	13.3
Badiraguato	1,290.6	1,285.5	5.0	4,839.4	3,230.4	861.5	858.1	3.4
Cosalá	701.8	698.9	2.9	2,172.1	151.5	48.9	48.7	0.2
Salvador Alvarado	15.0	2.0	13.0	76,596.4	13.7	0.0	0.0	0.0
Angostura	21.2	4.4	16.8	1,908.9	14.0	0.2	0.0	0.1
Guadalupe y Calvo	5.3	5.3	0.0	9,621.4	920.3	0.5	0.5	0.0
Tepehuanes	6.0	4.0	1.9	6,066.1	2,783.8	2.7	1.9	0.9
Topia	1.6	1.6	0.0	1,627.4	1,627.7	1.6	1.6	0.0
Canelas	0.4	0.4	0.0	88,348.5	684.5	0.0	0.0	0.0
Tamazula	1.7	1.6	0.1	5,800.4	3,154.1	0.9	0.9	0.1
Guanaceví	201.9	201.6	0.4	5,482.8	1,003.3	37.0	36.9	0.1
Santiago Papasquiaro	223.4	212.2	11.2	6,398.8	59.1	2.1	2.0	0.1
Total	3,376.6	3,146.2	230.4	-	-	955.4	950.6	4.8

Por otro lado, también se obtuvieron datos del Registro de Derechos de Agua sobre los usos del agua en la cuenca del Río Culiacán, como se muestra en la tabla 8, se consideraron los municipios con las áreas más representativas. En la gráfica 3, se puede observar cómo se distribuyen los diferentes

usos del agua, siendo una de las principales la generación de energía eléctrica y el uso público urbano.

Tabla 8 Usos en la cuenca del Río Culiacán

Usos	Volumen [hm ³]
Acuacultura	27.40
Agrícola	57.60
Agroindustrial	0.00
Diferentes usos	50.00
Doméstico	0.07
Generación de energía	1,806.37
Industrial	10.99
Pecuario	3.48
Público urbano	407.26
Servicios	2.17
Otros	0.30



Gráfica 3 Usos del agua en la cuenca del Río Culiacán

En la cuenca del Río Culiacán, destaca la disponibilidad de agua en las zonas alta, media y baja de la cuenca (ilustración 34). Es importante señalar que la cuenca actualmente no tiene disponibilidad de agua, lo que significa que no se pueden otorgar nuevas concesiones ni permisos para nuevos usos de agua en esta cuenca (CONABIO, 2018).

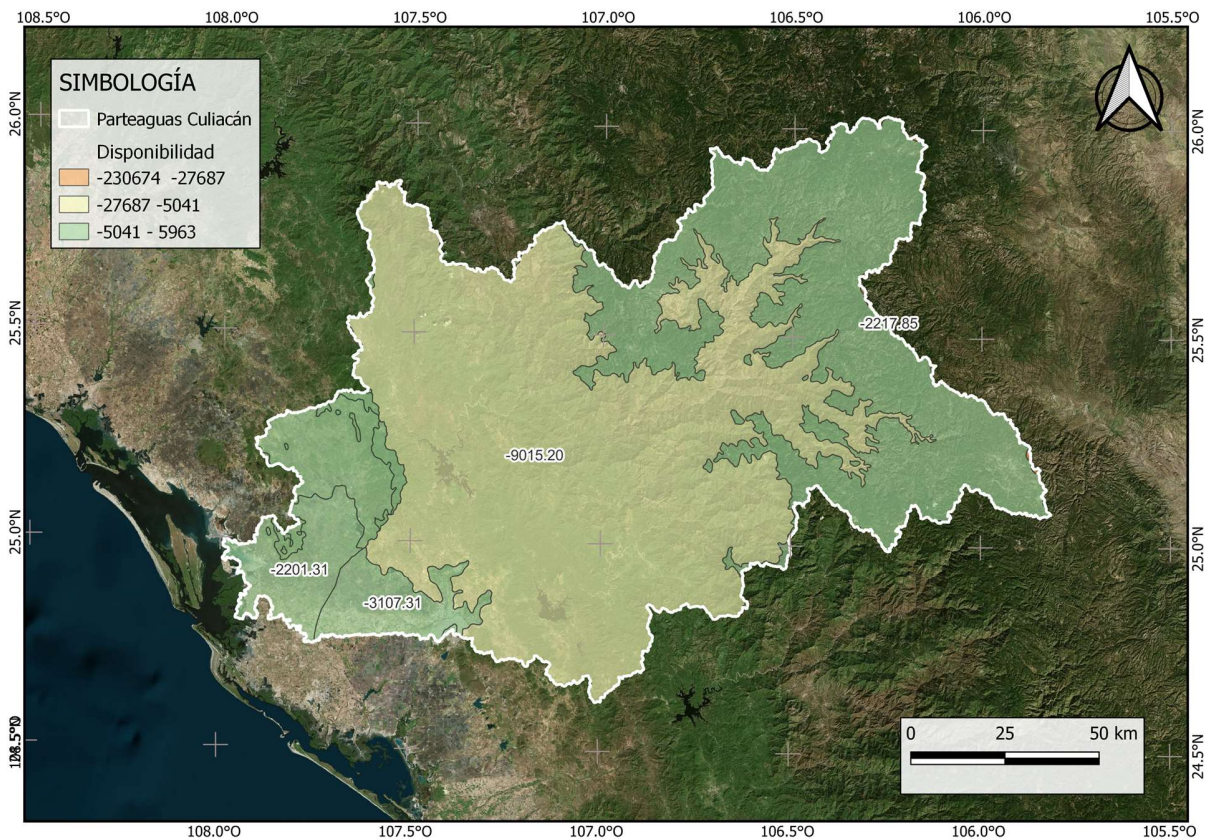


Ilustración 34 Disponibilidad de agua en la cuenca del Río Culiacán (CONABIO, 2008)

2.3. Estaciones hidrométricas

La cuenca del Río Culiacán cuenta con 19 estaciones hidrométricas para aforar el agua que fluye por los distintos ríos (ilustración 35).

Con la finalidad de analizar el régimen de flujo de los ríos donde se ubican dichas presas, es necesario disponer de estaciones hidrométricas aguas arriba, pero sobre todo aguas abajo de las mismas (ilustración 35). De esta forma, la presa Adolfo López Mateos cuenta con 7 (tabla 9) y la presa Sanalona con 4 (tabla 10). Además, existe una estación hidrométrica aguas bajo de ambas presas (tabla 9).

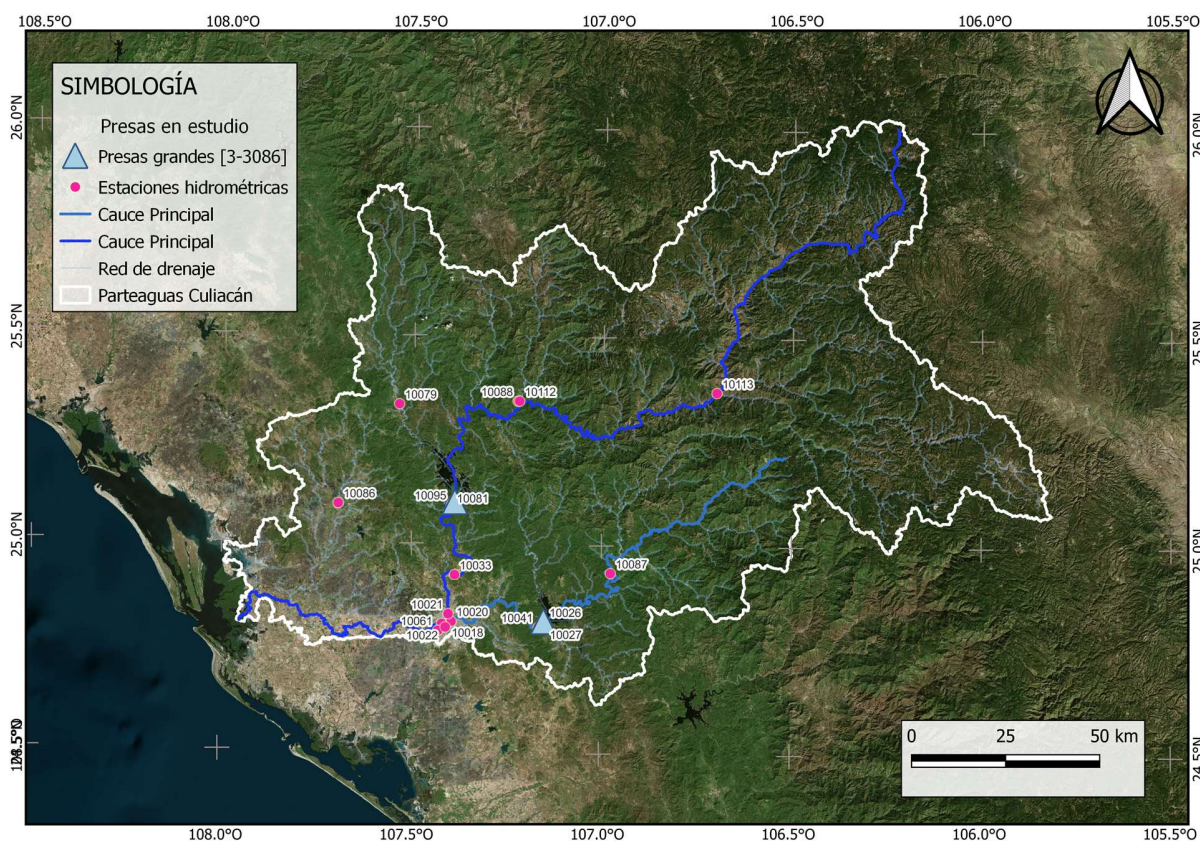


Ilustración 35 Estaciones hidrométricas en la Cuenca del Río Culiacán

Tabla 9 Estación hidrométrica aguas abajo de la presa Adolfo López Mateos y Sanalona

Presa Adolfo López Mateos y Sanalona						
Estación	Nombre	Inicio de registro	Fin de registro	Longitud	Latitud	Estado
Aguas abajo						
10018	Puente Sudpacífico	1924	1992	-107.14	24.80	Sinaloa



Tabla 10 Estaciones hidrométricas aguas arriba y aguas abajo de la presa Adolfo López Mateos

Presa Adolfo López Mateos						
Estación	Nombre	Inicio de registro	Fin de registro	Longitud	Latitud	Estado
Aguas arriba						
10113	La Huerta	1969	1999	-106.7	25.37	Durango
10088	Guatenipa	1965	2002	-108.76	26.60	Sinaloa
10112	Guatenipa II	1968	2011	-108.39	27.01	Sinaloa
10079	Badiraguato			-107.53	25.33	Sinaloa
Aguas abajo						
10081	El Varejonal	1960	1882	-107.22	25.34	Sinaloa
10021	Tierra Blanca	1932	1940	-107.4	-107.4	Sinaloa
10033	Palos Blancos	1938	1988	-106.45	26.33	Sinaloa

Tabla 11 Estaciones hidrométricas aguas arriba y aguas abajo de la presa Sanalona

Presa Sanalona						
Estación	Nombre	Inicio de registro	Fin de registro	Longitud	Latitud	Estado
Aguas arriba						
10087	Tamazula	1962	1999	-108.58	26.5	Sinaloa
Aguas abajo						
10026	Picachos	1937	1944	-108.35	25.74	Sinaloa
10041	Sanalona I	1944	1972	-108.58	26.47	Sinaloa
10020	Puente Cañedo	1932	1954	-107.39	24.81	Sinaloa



III. Caracterización y evaluación de la cuenca

En este apartado se presenta el análisis ambiental de la cuenca del Río Culiacán para determinar su grado de conservación mediante el estudio de 46 variables ambientales. Este análisis permitirá calcular cuatro índices que mostrarán el grado de conservación. Posteriormente, se realizará el análisis de caudales ambientales siguiendo la normativa mexicana apéndice B. Esto implicará, primero determinar la alteración del régimen hidrológico actual debido a la presencia de infraestructura en los ríos Humaya y Tamazula. Finalmente, se utilizarán índices ecohidrológicos basados en el método de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) para comparar los regímenes hidrológicos antes y después de la construcción de las presas Sanalona y Adolfo López Mateos. Si se detecta que las corrientes estudiadas están alteradas, se implementarán acciones para mejorar las condiciones del régimen utilizando la metodología del Rango de Variabilidad (RVA).

3.1. Análisis ambiental de la cuenca

Para analizar la condición de conservación de la cuenca del Río Culiacán, esta se discretizó en subcuencas en función de sus ríos principales: el río Humaya siendo la subcuenca más grande, el río Tamazula y el Río Culiacán; este último formado por la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula (ilustración 36, tabla 12). Se estudiará cada subcuenca para elaborar un diagnóstico sobre la conservación de la cuenca completa, evaluando el impacto ambiental a través del análisis de diversas variables ambientales.

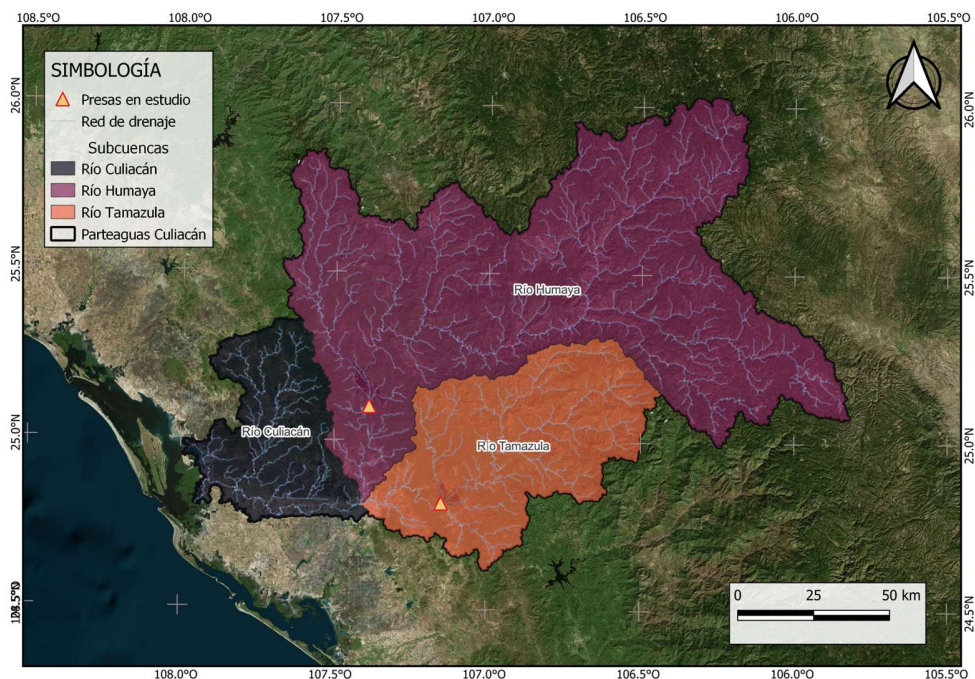


Ilustración 36 Subcuencas en estudio



Tabla 12 Superficie de las subcuencas en la cuenca de Río Culiacán

Subcuenca	Área (km ²)	Área (%)
Río Culiacán	2,356.91	13
Río Tamazula	4,133.63	23
Río Humaya	11,630.64	64
Total	18,121.18	100

Para determinar el grado de conservación de cada subcuenca, se utilizaron los tres índices establecidos y las variables ambientales correspondientes.

3.1.1. Índice de Sitios con Declaratoria Oficial

Mediante un análisis de información geoespacial de mapas en formato vectorial obtenidos de distintas dependencias como la Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO), la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), el Instituto Nacional de Información de Estadística y Geográfica (INEGI), se obtuvo el índice de sitios con declaratoria oficial con 9 variables ambientales, descritas a continuación:

- Número de Áreas Naturales Protegidas (ANP):** No se encontraron ANP en las subcuencas del área de estudio.
- Proporción de Áreas Naturales Protegidas (ANP) [%]:** No se encontraron ANP en las subcuencas del área de estudio.
- Número de sitios RAMSAR:** Se encontró únicamente un sitio RAMSAR (CONANP, 2014; tabla 13).

Tabla 13 Sitios RAMSAR en la cuenca del Río Culiacán

Numero de sitio	RAMSAR	Estado	Municipios	Fecha	Subcuenca	Área km ²
1	Laguna Playa colorada Santa María Reforma	Sinaloa	Angostura, Navolato y Guasave	02/02/2004	Río Culiacán	60.47

- Proporción de sitios RAMSAR [%]:** Se calculó la extensión en porcentaje ocupada por cada sitio RAMSAR con respecto a la superficie de la subcuenca donde se ubica.
- Número de Unidades de Manejo Ambiental (UMA):** Se encontraron 6 sitios distribuidos entre la subcuenca del Río Culiacán y Río Humaya (CONABIO, 2010; tabla 14).

Tabla 14 Unidades de Manejo Ambiental en la cuenca del Río Culiacán

Numero de sitio	Nombre	Municipio	Subcuenca	Área (km ²)
1	Corral Quemado	Mocorito	Río Humaya	3.6
2	Mesa Del Carpintero	Topia	Río Humaya	11.7
3	El Ballo	Santiago Papasquiario	Río Humaya	0.1

4	Laguna de Chiricahueto	Culiacán y Navolato	Río Humaya	179.4
5	Patolandia	Angostura	Río Culiacán	24.0
6	Patolandia	Angostura	Río Culiacán	5.4

- 6 **Proporción de Unidades de Manejo Ambiental (UMA) [%]:** Con la información obtenida previamente, se calculó la extensión en porcentaje ocupada por cada unidad de manejo ambiental con respecto a la subcuenca donde se ubica.
- 7 **Proporción con ANP con plan de manejo vigente (<5 años) [%]:** Las subcuencas del área de estudio no cuentan con ANP.
- 8 **Proporción con ANP sin plan de manejo vigente (>5 años) [%]:** Las subcuencas del área de estudio no cuentan con ANP.
- 9 **Proporción con ANP sin plan de manejo [%]:** Las subcuencas del área de estudio no cuentan con ANP.

El resumen del procedimiento anterior se muestra en la tabla 15.

Tabla 15 Valores de las variables consideradas para los sitios prioritarios de las subcuencas

Subcuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Río Culiacán	0	0	1	2.57	2	1.25	0	0	0
Río Tamazula	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Río Humaya	0	0	0	0	4	1.68	0	0	0

Siguiendo con el procedimiento de Cantú et al. (2018), cada variable fue normalizada (ecuación 1) para que sus valores se encuentren entre 0 y 1 (tabla 16).

Tabla 16 Valores normalizados

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vn Río Culiacán	0.0	0.0	1.0	1.0	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0
Vn Río Tamazula	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vn Río Humaya	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0

Mediante un análisis en función de la importancia que tiene cada una de las variables con relación al impacto hídrico se aplica la escala de ponderación según Cantú et al. (2018), (tabla 17).

Tabla 17 Valores ponderados

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vp Río Culiacán	0.00	0.00	8.00	8.00	2.00	2.98	0.00	0.00	0.00
Vp Río Tamazula	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vp Río Humaya	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00



Para que las variables tengan valores entre 0 y 100 (w), se multiplica el valor normalizado por el valor máximo de ponderación y por el número total de variables. En este caso, el número total de variables son 9 y el valor máximo de ponderación corresponde a 10 (tabla 18).

Tabla 18 Valores de w

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w Culiacán	0.0	0.0	90.0	90.0	45.0	67.1	0.0	0.0	0.0
w Tamazula	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
w Humaya	0.0	0.0	0.0	0.0	90.0	90.0	0.0	0.0	0.0

Con el fin de igualar el peso de las variables, se obtuvo la constante k , dividiendo 100 entre los valores w (tabla 19).

Tabla 19 Valores de la constante k

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k Culiacán=	0.0	0.0	1.1	1.1	2.2	1.5	0.0	0.0	0.0
k Tamazula=	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
k Humaya=	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.1	0.0	0.0	0.0

Finalmente, se obtuvo el producto de la constante k por cada una de las variables ponderadas (tabla 20); para determinar el índice cada subcuenca se suman los índices de cada variable; el resultado final se presenta en la tabla 21.

Tabla 20 Índice para cada variable

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
II Río Culiacán=	0.0	0.0	8.9	8.9	4.4	4.4	0.0	0.0	0.0
II Río Tamazula=	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
II Río Humaya=	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	4.4	0.0	0.0	0.0

Tabla 21 Índice de Sitios con Declaratoria Oficial

Subcuenca	Índice
II Río Culiacán=	26.7
II Río Tamazula=	0.0
II Río Humaya=	8.9

3.1.2. Índice de Sitios Prioritarios Propuestos

De forma similar y mediante un análisis de información geoespacial de mapas en formato vectorial se obtuvo el índice de sitios con declaratoria oficial con las 16 variables ambientales correspondientes; los resultados se muestran en la tabla 22 y tabla 23.

Tabla 22 Valores de variables consideradas para el índice de sitios propuestos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Río Culiacán	1.00	12.35	0.00	0.98	4.04	2.34	6.65	35.39	2.62	0.00	6.50	3.89	2.71	1.58	1.00	8.04
Río Tamazula	4.00	22.16	9.63	1.57	0.70	2.71	15.88	16.92	0.00	0.00	2.58	6.93	26.09	18.44	3.00	8.27
Río Humaya	2.00	78.82	54.20	16.35	1.04	2.71	29.08	8.99	7.93	0.00	22.63	6.88	19.20	11.49	4.00	69.87

Donde:

1. Número de RHP
2. Proporción de región hidrológica prioritaria [%]
3. Proporción para servicios ambientales hidrológicos [%]
4. Proporción para conservación de la biodiversidad [%]
5. Proporción con hexágonos de prioridad extrema [%]
6. Proporción con hexágonos de prioridad alta [%]
7. Proporción con hexágonos de prioridad media [%]
8. Proporción con hexágonos terrestre de prioridad alta [%]
9. Proporción con hexágonos terrestre de prioridad media [%]
10. Proporción con hexágonos terrestre de prioridad extrema [%]
11. Proporción de Regiones Terrestres Prioritarias [%]
12. Sitios de atención prioritaria extrema para conservación
13. Sitios de atención prioritaria alta para conservación
14. Sitios de atención prioritaria media para conservación
15. Número de Áreas Importantes para la Conservación de las Aves
16. Proporción de Áreas Importantes para la Conservación de las Aves [%]

Tabla 23 Índice de sitios prioritarios propuestos

Subcuenca	Índice
II Río Culiacán=	70.0
II Río Tamazula=	67.7
II Río Humaya=	86.0

3.1.3. Índice de Impacto Ambiental

De igual forma, mediante un análisis de información geoespacial de mapas en formato vectorial se obtuvo el índice de sitios con declaratoria oficial con 21 variables ambientales; los resultados se muestran en la tabla 24 y la tabla 25.

Tabla 24 Valores de variables consideradas para el índice de impacto ambiental

Subcuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Río Culiacán	137	0	1994	3,826	1,646	3	1	-6,561,389.03	-328.98	13	0	0	5	1	56	51	2	0	18	15	11.62
Río Tamazula	133	0	1325	1,068	1,219	1	0	-8,048,563.19	-756.48	23	0	0	4	0	0	8	42	61	3	0	8.58
Río Humaya	159	0	1526	2,188	519	0	0	-54,212,826.83	-4,305.74	64	0	8	6	8	22	26	21	34	45	0	27.43

Donde:

1. Consumo de agua de uso urbano [hm³]



2. Consumo de agua uso pecuario [hm³]
3. Consumo de agua uso agrícola [hm³]
4. Número de habitantes urbanos
5. Número de habitantes rurales
6. Proporción de cuencas con manchas urbanas [%]
7. Proporción de cuencas con manchas rurales [%]
8. Total de agua disponible vs demanda balance hídrico [hm³]
9. Volumen promedio disponible de agua en acuíferos [hm³]
10. Ajuste proporcional de disponibilidad de acuíferos [%]
11. Proporción de erosión eólica
12. Proporción hídrica cárcavas
13. Proporción hídrica laminar
14. Proporción por rango de evaporación 400-500 mm [%]
15. Proporción por rango de evaporación 500-600 mm [%]
16. Proporción por rango de evaporación 600-700 mm [%]
17. Proporción por rango de evaporación 700-800 mm [%]
18. Proporción por rango de evaporación 800-900 mm [%]
19. Puntos de calor de incendios forestales entre 2000 y 2023
20. Proporción de cuenca con veda
21. Incremento de usos antrópicos entre series de suelo 3 y 7

Tabla 25 Índice de impacto ambiental

Subcuenca	Índice
II Río Culiacán=	73.33
II Río Tamazula=	66.67
II Río Humaya=	73.33

3.1.4. Índice del Grado de Conservación

Este índice se calcula mediante el promedio de Sitios con declaratoria oficial e índice de sitios prioritarios propuestos menos el índice de impacto ambiental (tabla 26). El índice de grado de conservación indica que sitios son afectados fuertemente por el impacto ambiental y los que no tienen los instrumentos para que se conserven o restauren.

Tabla 26 Índice de grado de conservación

Subcuenca	Índice
II Río Culiacán	-25.00
II Río Tamazul	-32.83
II Río Humaya	-25.89

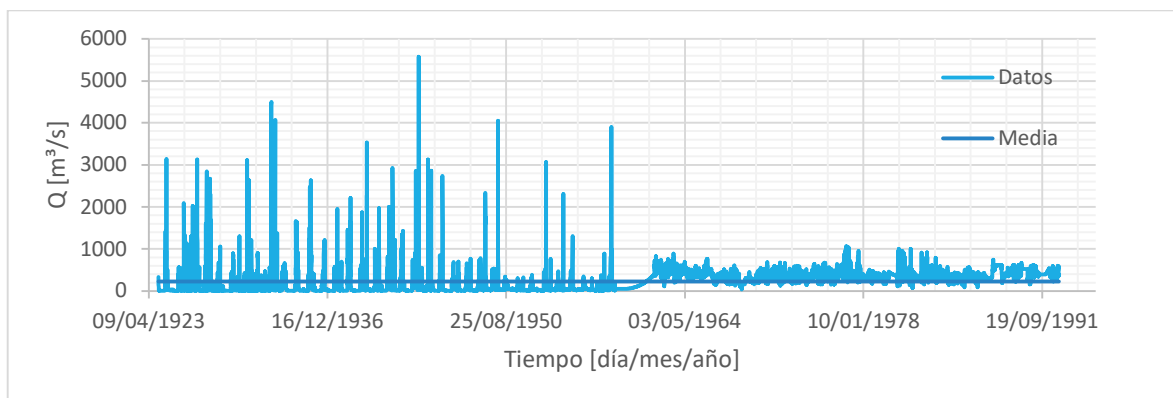
3.2. Series de tiempo de caudales

En esta sección, se describe el proceso de recopilación y preparación de las series de caudales. En la zona de estudio existen estaciones hidrométricas (EH) aguas abajo y aguas arriba de las presas

(Figura 34), pero solamente la EH 10018, la cual se ubica aguas abajo de ambas presas y cuenta con datos antes y después de la construcción de estas; es por ello, se analizará en este apartado, ya que permitirá obtener un resultado general representativo; los resultados de la EH 10033 situada aguas abajo de la presa Adolfo López Mateos y la EH 10041 aguas abajo de la presa Sanalona se encuentran en los anexos.

Es común que la mayoría de las estaciones, entre ellas, las hidrométricas no cuenten con registros completos, por ello es necesario aplicar técnicas para completar los datos. Las técnicas utilizadas en las estaciones hidrométricas indicadas anteriormente fueron regresión estadística lineal con la estación hidrométrica más cercana y PCHIP mediante MatLab; con ello se dispone de series de tiempo de caudales medios diarios completas.

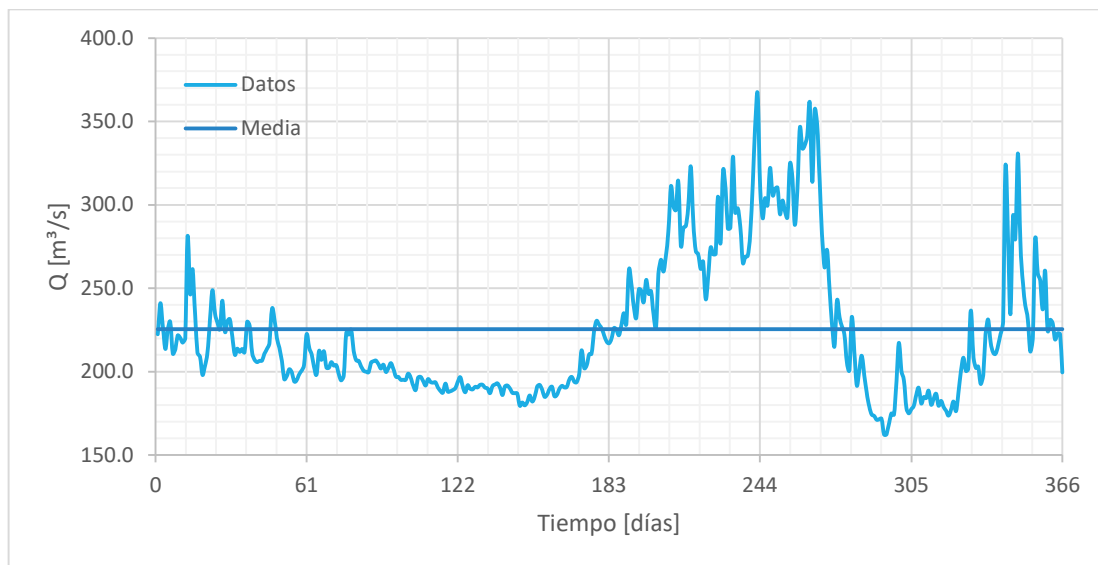
La EH 10018 Puente Sudpacífico, está situada sobre el Río Culiacán aguas abajo de ambas presas en estudio, dentro de los límites de la ciudad de Culiacán, en el estado de Sinaloa. Los datos hidrométricos fueron obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS); tiene datos disponibles en los años 1924-1992 (gráfica 4).



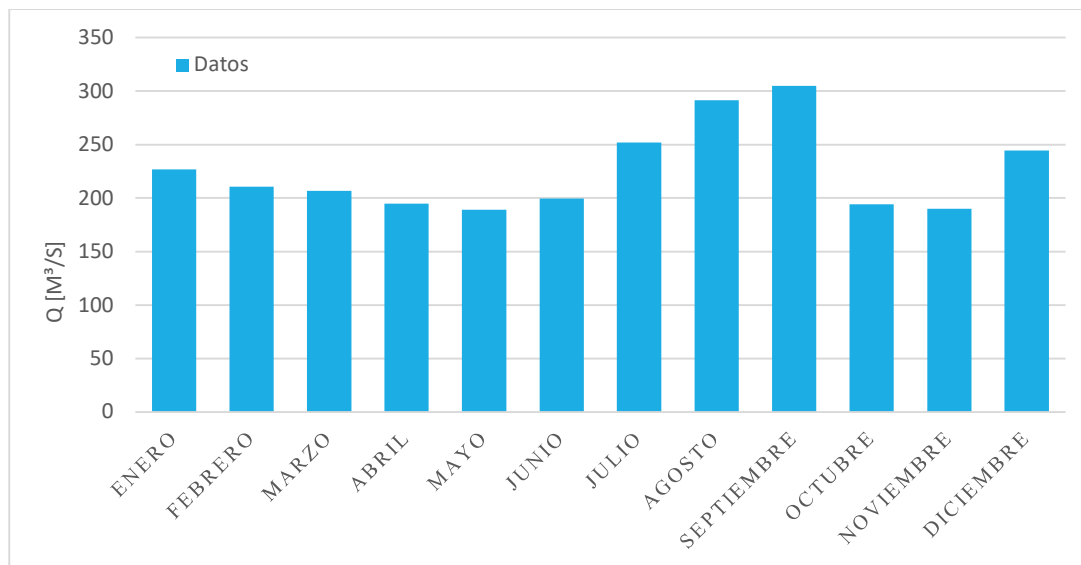
Gráfica 4 Registro de caudales medios diarios en la EH 10018 Puente Sudpacífico

3.3. Caracterización de caudales.

La EH 10018 Puente Sudpacífico presenta una disminución notable en la magnitud y variabilidad en los registros diarios a partir del año 1958, que coincide con la construcción de la presa Adolfo López Mateos en el año 1963 (gráfica 5); no se observan cambios debido a la construcción de la presa Sanalona en 1949. Un análisis del hidrograma normal (caudales diarios promedio) EH 10018, muestra la época de lluvias en los meses centrales del año, pero no son tan grandes con respecto a la época de estiaje, indicando una posible estacionalidad en el comportamiento del río (gráfica 5); además se identifica otro periodo de escurrimientos en los meses de noviembre-enero debido a los frentes fríos provenientes del norte del continente. Los caudales mensuales promedio también muestran un comportamiento similar (gráfica 6); los meses de julio- septiembre y diciembre-enero con caudales ligeramente mayores, reflejando un patrón estacional característico.

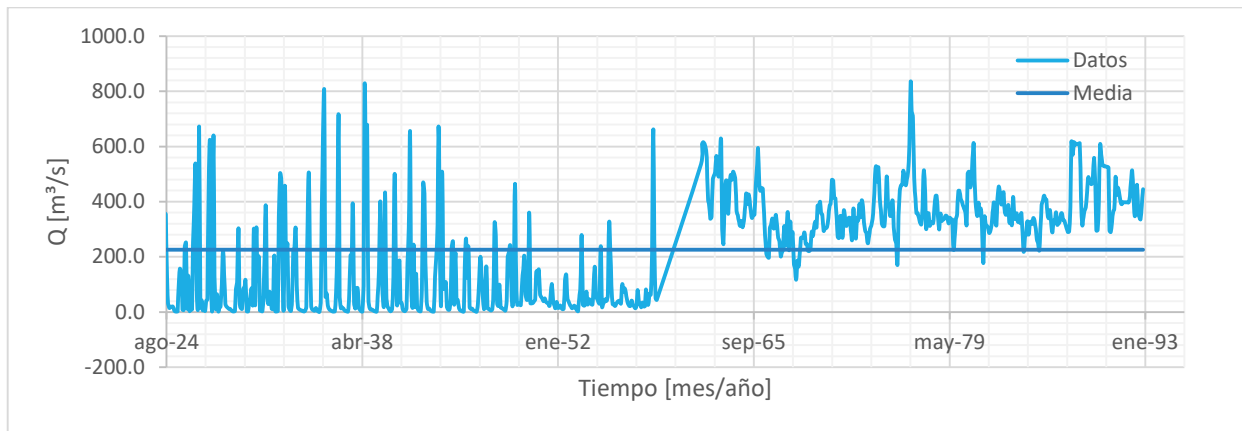


Gráfica 5 Caudales medios diarios promedio en la EH 10018 Puente Sudpacífico



Gráfica 6 Caudal medio mensual promedio en la EH 10018 Puente Sudpacífico

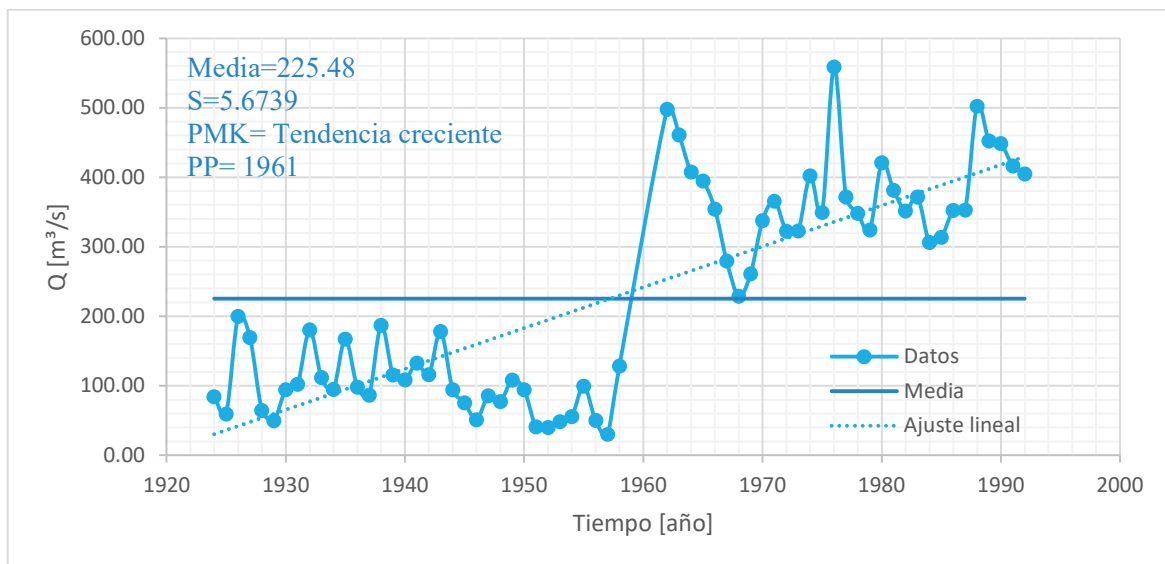
Los caudales mensuales de la estación hidrométrica muestran una alta variabilidad, con picos significativos en ciertos años, pero a partir de 1958, posterior a la entrada en operación de la presa Adolfo López Mateos, hay un aumento de estos, pero la variabilidad disminuye (gráfica 7).



Gráfica 7 Caudales mensuales en la estación 10018 Puente Sudpacífico

3.3.1. Tendencias

Para determinar la existencia de tendencia en la serie de tiempo anual de caudales, se utilizaron pruebas estadísticas no paramétricas de Mann-Kendall y de Pettitt y regresión estadística lineal. Todas las pruebas muestran una tendencia ascendente; la prueba de Pettitt indica el cambio en 1961 con medias de 97.75 y 372.85 m³/s y la regresión estadística lineal con una pendiente de 5.40 m³/s/años (gráfica 8).



Gráfica 8 Tendencias en la EH 10018 Puente Sudpacífico

3.3.2. Caudal ecológico

La norma mexicana NMXN-AA-159-SCFI-2012, en el apéndice A indica que la cuenca del Río Culiacán tiene un estado de conservación deficiente (tabla 27).

Tabla 27 Condición de la cuenca del Río Culiacán (NMXN-AA-159-SCFI-2012)

Clave de región hidrológica	10
Nombre de la región hidrológica	Sinaloa
Nombre de la cuenca	Río Culiacán
Importancia ecológica	Alta
Presión de uso	Muy alta
Estado de conservación deseado	Deficiente
Objetivo ambiental	D

El procedimiento para determinar la alteración del régimen hidrológico en una corriente por la presencia de infraestructura hidráulica se inicia con la serie de caudales diarios con al menos 20 años completos en cada régimen hidrológico; el régimen hidrológico natural (tabla 28) se refiere al régimen sin alteraciones y el régimen hidrológico actual o alterado (tabla 29) representa el régimen después de ser alterado, en este caso por las presas.

Tabla 28 Régimen natural en la EH 10018 Puente Sudpacífico

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1924	81.4	11.0	6.9	3.3	2.3	4.0	356.7	353.8	119.5	30.4	14.7	18.9
1925	19.3	19.3	6.9	1.6	1.8	3.2	110.9	157.1	134.7	8.7	8.1	235.0
1926	250.3	11.0	131.4	5.0	42.3	11.3	253.9	390.5	526.1	65.8	14.0	671.9
1927	17.8	43.1	6.9	9.5	4.2	40.5	47.0	459.6	614.6	126.2	14.7	640.1
1928	129.9	11.0	64.4	3.3	15.8	20.0	99.5	223.7	138.2	30.6	19.9	16.3
1929	11.2	11.0	6.9	3.3	2.3	4.0	83.7	118.8	303.8	29.2	14.7	11.6
1930	82.1	90.6	114.2	3.3	2.3	30.3	53.2	86.2	29.2	302.0	23.5	307.5
1931	114.9	202.9	9.3	51.1	2.3	46.8	210.5	387.2	63.4	28.9	74.4	42.1
1932	11.2	10.7	205.2	3.3	2.3	4.0	344.9	502.5	471.1	117.7	14.7	457.3
1933	145.4	249.5	24.2	7.6	4.5	39.2	220.9	235.1	302.8	96.5	15.3	10.0
1934	6.9	5.6	3.4	2.3	4.1	21.0	323.9	503.7	216.6	24.7	8.4	6.3
1935	5.1	15.0	5.0	2.5	1.1	33.4	361.8	642.3	788.1	54.7	68.1	24.0
1936	11.7	7.0	4.8	2.5	1.5	3.6	73.3	278.8	715.8	53.9	13.6	16.5
1937	12.1	6.0	3.7	2.4	1.6	66.2	204.4	210.4	394.2	35.7	12.9	85.8
1938	86.6	15.8	8.0	3.5	2.0	93.2	822.9	455.8	669.5	47.5	16.7	9.0
1939	9.0	5.9	3.5	2.0	1.7	60.4	155.4	400.7	211.5	66.8	23.4	432.9
1940	61.8	22.7	13.4	5.3	3.0	13.7	126.4	501.0	239.6	29.6	90.7	186.8
1941	34.8	32.7	8.0	4.3	3.8	13.9	178.2	304.9	656.0	91.2	15.7	244.0
1942	18.2	138.6	19.7	6.3	3.0	2.7	83.7	465.2	430.3	179.4	37.2	11.5
1943	12.2	6.7	3.3	2.0	1.6	127.8	200.9	317.3	672.8	244.6	27.1	508.3



Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1944	84.6	89.6	106.6	18.4	8.7	8.9	48.6	232.6	254.1	26.4	213.7	47.1
1945	43.6	13.4	6.9	4.1	2.4	1.6	166.3	266.8	123.7	238.0	18.5	10.8
1946	12.2	6.6	3.9	2.4	1.3	29.2	116.0	199.9	140.7	61.1	10.4	24.4
1947	166.0	15.2	10.9	7.5	5.4	10.1	59.1	321.5	273.3	32.1	22.1	99.0
1948	16.9	14.7	11.2	7.6	5.6	42.8	200.4	216.5	240.3	77.9	20.7	66.9
1949	464.8	106.3	26.1	30.4	27.4	25.0	103.7	156.3	201.5	62.9	43.2	49.0
1950	360.9	31.8	32.2	32.2	39.1	46.4	148.3	108.5	155.6	67.1	53.8	49.4
1951	39.4	49.6	38.0	33.6	31.3	22.3	58.5	101.6	39.0	26.7	13.2	36.2
1952	15.9	16.0	24.0	14.5	10.6	12.3	114.6	135.1	47.5	39.3	27.0	20.6
1953	13.8	18.9	23.2	14.0	6.6	3.2	54.0	93.0	279.4	26.8	22.5	27.5
1954	73.7	27.0	46.4	41.8	29.7	27.0	83.1	163.8	58.6	48.7	36.6	30.4
1955	238.4	18.5	29.1	36.8	46.0	40.5	64.2	319.9	241.5	95.9	28.1	28.8
1956	22.0	29.3	36.4	40.4	39.6	30.8	100.1	73.8	86.2	71.6	44.1	29.7
1957	21.8	22.9	41.8	25.7	20.6	13.7	20.8	80.1	33.7	29.2	17.5	34.8
1958	20.2	21.5	81.9	34.1	26.2	66.5	62.7	209.6	661.5	259.8	51.2	44.4
Promedio	77.6	39.9	33.4	13.4	11.5	29.1	163.2	276.4	301.0	80.8	32.9	129.6

Tabla 29 Régimen alterado en la EH 10018 Puente Sudpacífico

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1962	536.1	607.1	615.6	609.2	597.7	559.7	409.7	389.7	338.0	346.8	478.7	493.4
1963	506.6	565.2	529.8	490.0	544.4	619.8	300.0	245.8	419.0	476.8	475.6	356.1
1964	458.5	497.7	479.0	508.0	498.9	479.2	365.6	350.7	326.6	311.8	330.3	307.2
1965	330.0	371.6	430.0	391.6	427.0	405.3	362.7	340.7	356.3	352.7	456.2	511.6
1966	594.7	463.4	439.4	449.7	445.9	358.2	278.2	211.4	201.0	197.1	303.6	317.7
1967	338.8	301.9	323.6	352.7	309.6	268.9	256.5	202.9	216.4	226.3	311.5	239.6
1968	302.9	360.6	223.3	327.6	252.6	288.2	180.2	156.6	117.1	185.7	164.9	206.6
1969	269.0	269.4	269.0	287.9	247.2	246.7	222.5	220.9	228.5	290.6	274.3	306.6
1970	327.3	307.4	384.5	367.5	399.2	358.4	351.6	294.7	304.1	303.3	308.8	342.2
1971	386.0	393.8	478.4	475.9	414.3	410.6	338.4	272.0	268.3	346.8	326.6	268.7
1972	366.0	342.3	311.5	329.3	340.8	340.3	294.1	263.2	375.2	315.5	266.1	341.1
1973	331.2	392.1	342.7	404.0	381.5	324.4	293.8	284.4	249.1	267.0	300.7	312.5
1974	336.8	383.1	478.3	528.5	472.8	524.8	424.9	370.0	320.3	310.8	311.7	367.5
1975	491.5	396.0	390.4	348.1	377.6	402.1	307.4	261.4	247.7	172.3	349.0	438.7
1976	459.1	462.1	511.8	482.1	459.3	481.2	509.4	606.7	836.2	726.3	703.2	484.0
1977	411.1	358.4	357.6	340.8	325.0	317.9	377.0	511.7	464.1	304.0	333.6	357.7
1978	313.1	324.7	324.5	321.6	378.2	420.5	421.1	348.8	298.6	357.0	330.1	334.1
1979	336.4	347.6	349.1	342.4	321.2	342.0	327.4	334.6	226.6	264.4	334.8	353.5
1980	438.0	439.4	411.9	400.1	386.8	373.8	360.8	318.4	501.7	508.5	452.0	476.6
1981	555.6	608.1	440.6	380.5	347.1	395.8	349.9	374.4	301.3	177.0	343.9	317.6
1982	313.2	303.4	286.4	294.4	316.3	361.2	397.9	333.3	315.2	410.6	454.0	430.8
1983	390.0	394.8	434.7	364.7	352.6	354.7	387.6	321.9	367.2	313.9	417.0	352.9
1984	336.0	358.3	327.1	333.6	323.2	357.6	278.7	218.3	271.6	282.6	328.9	279.8
1985	319.3	327.5	319.2	340.2	330.8	301.1	264.6	248.5	223.9	297.3	387.6	402.5
1986	421.6	406.2	406.7	351.2	340.0	369.1	321.5	288.9	330.9	322.9	361.7	316.0
1987	320.2	326.1	351.2	358.2	333.5	331.5	316.8	303.5	289.9	291.7	381.8	614.4
1988	569.3	614.4	606.0	610.3	608.0	609.0	611.9	416.5	315.9	344.3	367.6	378.5
1989	432.1	487.7	477.6	469.0	463.7	483.9	558.8	455.1	295.7	296.9	401.6	605.3
1990	573.0	531.6	530.4	527.7	526.8	526.0	523.3	296.3	289.4	325.4	365.3	373.6
1991	490.7	424.9	450.8	433.4	404.5	390.6	397.6	397.6	397.6	397.6	397.6	397.6



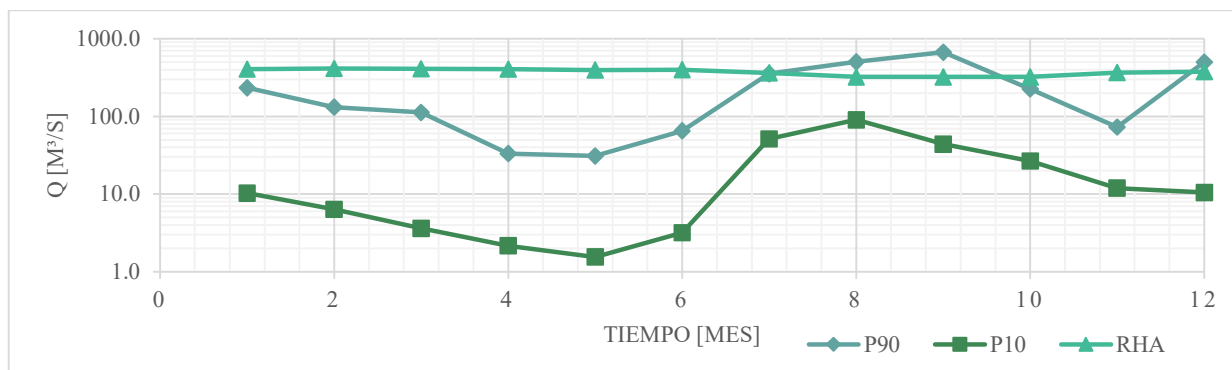
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1992	419.7	482.0	511.3	427.4	347.4	354.8	461.7	361.1	343.3	336.5	385.0	445.3
Promedio	408.8	414.5	412.7	408.0	395.9	398.6	363.0	322.6	323.8	324.5	367.9	378.4

Después se calcularon los percentiles 90 (P90) y 10 (P10) para cada mes (tabla 30 y gráfica 9) y para el año completo de la serie del régimen hidrológico natural (tabla 31 y gráfica 10); el percentil 90 representa el caudal máximo ordinario y el percentil 10 el caudal mínimo ordinario. El objetivo de este paso es comparar la serie de caudales naturales con los de la serie del régimen alterado para determinar si existe alteración hidrológica.

Tabla 30 Percentiles mensuales

MENSUAL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Percentil 10	10.3	6.4	3.6	2.2	1.5	3.2	51.4	90.3	44.1	26.5	11.9	10.5
Percentil 90	233.5	132.1	112.7	33.3	31.0	65.1	354.3	502.2	672.1	226.3	73.1	498.1
Cumple	0	0	0	0	0	0	16	29	30	5	0	28
Datos totales	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
% que cumple	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.6	93.5	96.8	16.1	0.0	90.3

% que cumple: 29.0 CUENCA ALTERADA

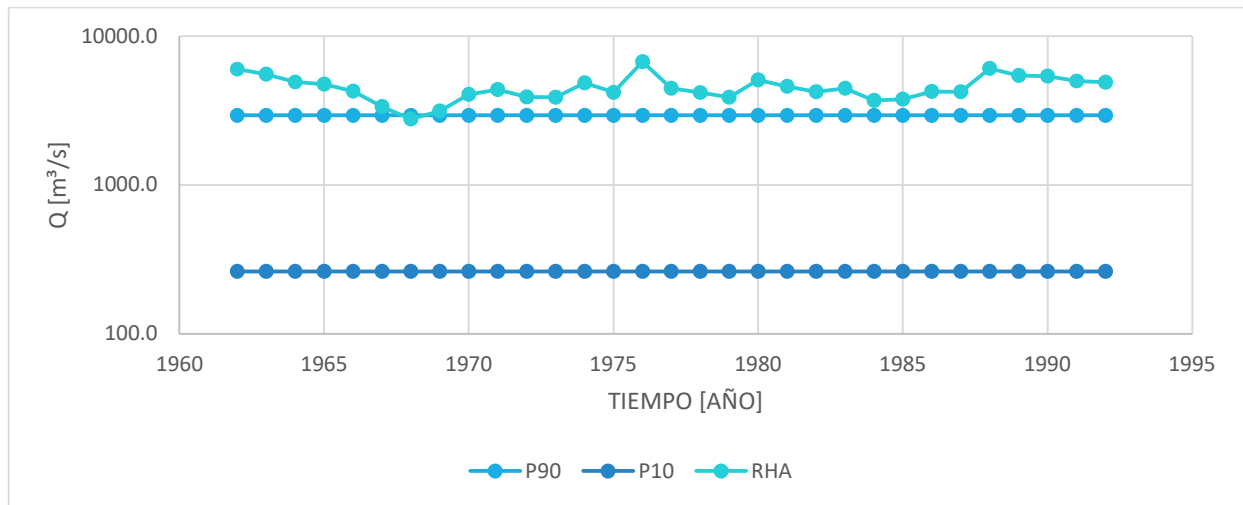


Gráfica 9 Régimen hidrológico mensual

Tabla 31 Percentiles anuales

ANUAL	DATOS
Percentil 10	261.9
Percentil 90	2933.8
Caudal medio anual	21.8
Caudal medio anual	244.5
Cumple	1
Datos totales	31
% que cumple	3.2

CUENCA ALTERADA



Gráfica 10 Régimen hidrológico anual

Dado que los criterios de cumplimiento tanto de los caudales mensuales como anuales del régimen hidrológico actual son menores al 50% con relación al régimen hidrológico natural, por lo tanto, la cuenca está alterada.

3.3.3. Análisis del régimen del flujo

Para analizar el régimen de flujo en la EH 10018 Puente Sudpacífico, se utilizó el software *Indicators of Hydrologic Alteration (IHA)* desarrollado por *The Nature Conservancy* usando la base teórica de Richter et al. (1996, 1997, 1998). El programa permite determinar variables de importancia ecológica a partir de la serie de caudales medios diarios (ilustración 37).

FlowDate	Tasa de caudal en mc-s	Julian Day
01/01/1924	338	1
02/01/1924	337	2
03/01/1924	268	3
04/01/1924	266	4
05/01/1924	206	5
06/01/1924	151	6
07/01/1924	150	7
08/01/1924	150	8
09/01/1924	103	9
10/01/1924	103	10
11/01/1924	64	11
12/01/1924	64	12
13/01/1924	64	13
14/01/1924	37	14
15/01/1924	36	15
16/01/1924	18	16
17/01/1924	18	17
18/01/1924	18	18
19/01/1924	7	19
20/01/1924	7	20
21/01/1924	7	21

Ilustración 37 Datos de entrada en el programa IHA

Se realizó la comparación de los dos periodos separados por la construcción de la presa Adolfo López Mateos, natural (1924-1958) y actual (1960-1992). Se calcularon 67 parámetros estadísticos divididos en 2 grupos (IHA y EFC); el primero calcula 33 parámetros distribuidos en 5 grupos (tabla 5), el segundo se refiere a los 5 componentes del caudal ecológico, que son los caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones (The Nature Conservancy, 2009)

Los parámetros se obtienen mediante el cálculo del valor medio de cada mes en el caso del primer grupo; el segundo grupo se centra en las condiciones hidrológicas extremas, datos mínimos y máximos en los periodos de tiempo definidos de 1, 3, 7, 30 y 90 días; los días cero se identifican por el número de días en un año hidrológico en el que el caudal es 0. El grupo 3 considera la fecha del caudal mínimo y máximo, si hay varios días con el mismo valor mínimo o máximo, se registra la fecha más cercana. En el caso del grupo 4, el programa por defecto determina pulsos altos, los correspondientes al percentil 75 o mayor y percentil 25 o menor para los pulsos bajos. El grupo 5 determina la frecuencia de los cambios de régimen, considerando periodos de crecimiento y decrecimiento, se cuenta el número de cambios de tasa de variación de caudal diario realizando el análisis anualmente (The Nature Conservancy, 2009). Los resultados para los 5 grupos antes descritos se muestran en la tabla 32.

Tabla 32 Resultados de método IHA de la EH 10018 Puente Sudpacífico

	MEDIAS		COEF. de VAR.		FACTOR DE DESVIACIÓN		DESV. del C.V.	
	Anterior	Posterior	Anterior	Posterior	Magnitud	%	Magnitud	%
Grupo 1								
Oct	83.0	305.9	1.0	0.4	222.9	268.5	-0.6	-60.9
Nov	41.1	340.0	1.5	0.4	298.9	726.8	-1.2	-76.8
Dec	138.0	349.2	1.4	0.4	211.2	153.0	-1.0	-74.0
Jan-	77.6	379.6	1.4	0.3	302.0	389.3	-1.0	-74.8
Feb	39.8	383.8	1.4	0.3	343.9	863.7	-1.1	-75.8
Mar	33.4	381.5	1.3	0.3	348.1	1,043.0	-1.0	-74.7
Apr	13.3	380.3	1.1	0.3	367.0	2,758.0	-0.8	-70.7
May	11.5	372.2	1.2	0.3	360.7	3,146.0	-0.9	-73.4
Junio	29.1	375.2	1.0	0.3	346.1	1,188.0	-0.6	-65.5
Julio	163.2	339.3	0.9	0.3	176.1	107.9	-0.6	-62.4
Ago	276.4	305.5	0.5	0.4	29.1	10.5	-0.2	-34.7
Sep	301.0	308.1	0.8	0.4	7.2	2.4	-0.3	-43.5
Grupo 2								
1-día mínimo	3.7	152.3	1.1	0.4	148.6	3,969.0	-0.7	-64.3
3-días mínimo	4.2	173.9	1.2	0.4	169.7	3,995.0	-0.8	-68.6
7-días mínimo	4.9	196.3	1.2	0.4	191.4	3,907.0	-0.9	-70.7
30-días mínimo	6.4	236.4	1.2	0.3	230.0	3,619.0	-0.9	-73.9
90-días mínimo	10.2	279.1	0.9	0.3	268.9	2,625.0	-0.6	-67.8
1-día máximo	2,251.0	680.0	0.6	0.3	-1,571.0	-69.8	-0.3	-45.2
3-días máximo	1,575.0	619.3	0.6	0.3	-955.4	-60.7	-0.3	-48.9
7-días máximo	1,003.0	573.8	0.6	0.3	-428.8	-42.8	-0.3	-49.3
30-días máximo	459.6	477.9	0.5	0.3	18.4	4.0	-0.2	-38.4
90-días máximo	263.6	425.8	0.5	0.3	162.2	61.5	-0.2	-42.3
No. días cero caudal	0.9	0.0	5.2	0.0	-0.9	-100.0	-5.2	-100.0
Índice caudal base	0.1	0.6	1.5	0.3	0.5	680.0	-1.2	-81.9
Grupo 3								
Fecha de caudal mín	138.2	263.4	0.2	0.1	125.2	68.4	-0.1	-49.2
Fecha de caudal máx	227.2	79.2	0.3	0.3	148.0	80.9	0.0	8.9
Grupo 4								
Conteo pulsos bajos	3.5	0.0	0.9	0.0	-3.5	-100.0	-0.9	-100.0
Duración pulsos bajo	34.0		0.8					
Conteo pulsos altos	6.4	18.8	0.6	0.6	12.4	193.6	0.1	9.1
Duración pulsos alto	3.9	17.4	0.6	1.4	13.4	339.6	0.8	137.2
Umbral de pulso bajo	9.0							
Umbral de pulso alto	354.6							
Grupo 5								
Tasa de subida	97.6	34.0	0.6	0.5	-63.7	-65.2	-0.1	-12.2
Tasa de bajada	-56.3	-35.1	-0.7	-0.4	21.2	-37.6	0.3	-42.7
Número de reversas	78.4	136.7	0.3	0.4	58.3	74.4	0.1	18.9

3.3.4. Evaluación de la gestión del agua disponible

El análisis de rango de variabilidad se usa para evaluar como las alteraciones antropogénicas afectan el régimen hidrológico de los ríos; este análisis funciona solamente para comparar dos periodos, pre-

impacto y post-impacto; el análisis se calcula a partir de los 33 parámetros calculados en el método IHA (The Nature Conservancy, 2009).

En el régimen no alterado, cada parámetro se divide en categorías en función de la desviación estándar, se calcula la frecuencia en la que los caudales considerados con alteración caen dentro de cada categoría y para cada una se determina un factor de alteración hidrológica; si el factor tiene valor positivo significa que la frecuencia en la categoría aumenta, si el valor es negativo ocurre lo contrario, la frecuencia en la categoría disminuye (The Nature Conservancy, 2009). En la tabla 33 se muestra los factores de alteración hidrológica para cada categoría.

Tabla 33 Rango de variabilidad en la EH 10018 Puente Sudpacífico

t	Pre: 1924-1958		Post: 1959-1991		Límites de RVA		AH				
	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Bajo	Alto	(Cat. media)
Grupo 1											
Oct	83.0	1.0	9.0	338.0	305.9	0.4	55.7	726.3	29.5	164.2	-0.9
Nov	41.1	1.5	8.3	338.0	340.0	0.4	51.2	703.2	15.0	104.6	-0.9
Dic	138.0	1.4	6.1	671.8	349.2	0.4	44.5	614.4	19.1	329.6	-0.3
Ene	77.6	1.4	5.1	464.8	379.6	0.3	49.0	594.8	12.2	183.3	-0.9
Feb	39.8	1.4	5.5	249.6	383.8	0.3	49.0	608.2	11.0	95.9	-0.9
Mar	33.4	1.3	3.2	205.2	381.5	0.3	49.0	615.5	7.0	78.1	-0.9
Abr	13.3	1.1	1.5	51.0	380.3	0.3	49.0	610.2	3.0	27.9	-1.0
May	11.5	1.2	1.0	46.0	372.2	0.3	49.9	607.9	2.0	25.6	-1.0
Jun	29.1	1.0	1.6	127.8	375.2	0.3	50.2	619.8	8.9	57.0	-1.0
Jul	163.2	0.9	20.8	823.0	339.3	0.3	51.1	611.9	64.3	311.7	-0.4
Ago	276.4	0.5	73.8	642.4	305.5	0.4	52.3	606.8	126.8	426.0	0.4
Sep	301.0	0.8	29.0	788.2	308.1	0.4	53.7	836.1	71.7	530.2	0.5
Grupo 2											
1-día mínimo	3.7	1.1	0.0	17.0	152.3	0.4	15.0	258.0	1.0	7.9	-1.0
3-días mínimo	4.2	1.2	0.0	19.0	173.9	0.4	15.7	300.3	1.0	9.2	-1.0
7-días mínimo	4.9	1.2	0.0	22.4	196.3	0.4	18.0	302.9	1.0	10.9	-1.0
30-días mínimo	6.4	1.2	1.0	31.3	236.4	0.3	40.2	329.8	1.8	14.1	-1.0
90-días mín.	10.2	0.9	1.8	32.1	279.1	0.3	47.3	425.6	2.7	19.9	-1.0
1-día máx.	2,251.0	0.6	299.0	5,573.0	680.0	0.3	119.0	1,066.0	917.4	3,585.0	-0.6
3-días máximo	1,575.0	0.6	176.3	4,035.0	619.3	0.3	118.3	1,040.0	593.5	2,556.0	-0.3
7-días máximo	1,003.0	0.6	110.7	3,060.0	573.8	0.3	117.7	973.6	383.9	1,621.0	0.3
30-días máximo	459.6	0.5	86.0	947.3	477.9	0.3	114.1	861.4	226.6	692.5	0.4
90-días máximo	263.6	0.5	49.0	663.0	425.8	0.3	105.6	656.5	122.2	405.0	-0.5
No. de días con caudal cero	0.9	5.2	0.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	0.0
Índice caudal base	0.1	1.5	0.0	0.4	0.6	0.3	0.3	0.9	0.0	0.2	-1.0
Grupo 3											
Fecha de caudal mín.	138.2	0.2	3.0	362.0	263.4	0.1	198.0	355.0	66.6	209.8	-1.0
Fecha de caudal máx.	227.2	0.3	1.0	360.0	79.2	0.3	1.0	356.0	117.0	337.3	0.0
Grupo 4											
Conteo pulsos bajos	3.5	0.9	0.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	6.7	-1.0
Duración pulsos bajo	34.0	0.8	1.0	90.5					7.8	60.1	-1.0
Conteo pulsos altos	6.4	0.6	0.0	15.0	18.8	0.6	0.0	39.0	2.6	10.1	-0.7
Duración pulsos alto	3.9	0.6	1.0	10.2	17.4	1.4	1.5	115.0	1.6	6.3	-0.4
El umbral de pulso bajo es			9.0								

t	Medias	CV	Pre: 1924-1958		Post: 1959-1991		Límites de RVA			AH (Cat. media)	
			Mínimo	Máximo	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Bajo		Alto
El umbral de pulso alto es			354.6								
Grupo 5											
Tasa de subida	97.6	0.6	12.2	247.6	33.9	0.5	1.0	67.1	41.7	153.6	-0.6
Tasa de bajada	-56.3	-0.6	-143.5	-7.6	-35.1	-0.4	-63.9	-15.1	-93.1	-19.5	0.3
Número de reversas	78.4	0.3	34.0	119.0	136.7	0.4	0.0	195.0	54.4	102.4	-0.9

3.4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos del índice de sitios con declaratoria oficial (ilustración 38), indican que la subcuenca del Río Tamazula no cuenta con instrumentos políticos significativos para la conservación de los recursos naturales. El valor 0 en la subcuenca manifiesta la necesidad urgente para establecer las medidas que sean necesarias de conservación. La ausencia de las áreas naturales protegidas en la cuenca refleja que existe en las subcuencas una falta de atención y esfuerzo para la preservación de la biodiversidad. Sucede algo similar ocurre en la subcuenca del Río Humaya, muestra una carencia importante de instrumentos políticos de conservación, el índice muestra la necesidad de implementar las estrategias necesarias para su conservación. En la subcuenca del río Culiacán presenta el puntaje más alto en comparación a las otras 2 subcuencas, sin embargo, la implementación de áreas naturales protegidas sigue siendo una limitación importante ya que los instrumentos actuales son valiosos, pero no son suficientes para fortalecer los mecanismos de gestión y conservación.

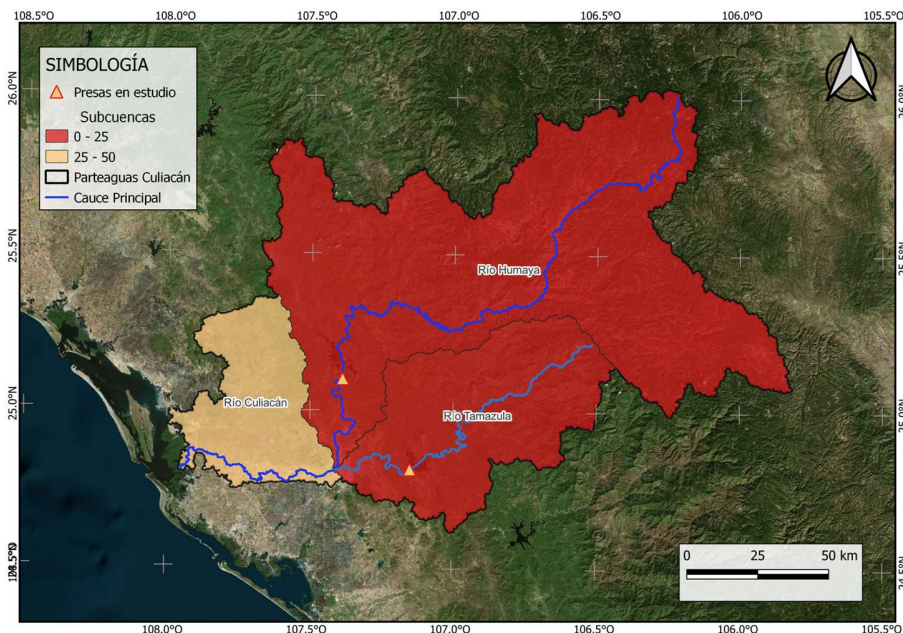


Ilustración 38 índice de sitios con declaratoria oficial en la cuenca del Río Culiacán

El índice de sitios prioritarios propuestos (ilustración 39), revela que la subcuenca del Río Humaya obtuvo el puntaje más alto, principalmente debido a su significativa extensión dentro de la cuenca del Río Culiacán. Esta subcuenca se caracteriza por enfrentar problemas destacados como la construcción de infraestructura hidráulica, contaminación del agua y una intensa actividad forestal.

Además, se identifican áreas dentro de esta subcuenca que han implementado estrategias específicas para el conocimiento y conservación de la biodiversidad. En contraste, la subcuenca del Río Culiacán muestra un puntaje intermedio, reflejando una alta proporción de hexágonos prioritarios. Esto indica la existencia de áreas específicas donde es importante maximizar los esfuerzos para la conservación de la biodiversidad.

Por otro lado, en la cuenca el río Tamazula se observa un puntaje más bajo en comparación con las otras dos subcuencas, predominando los sitios de conservación de prioridad media y sitios prioritarios alta

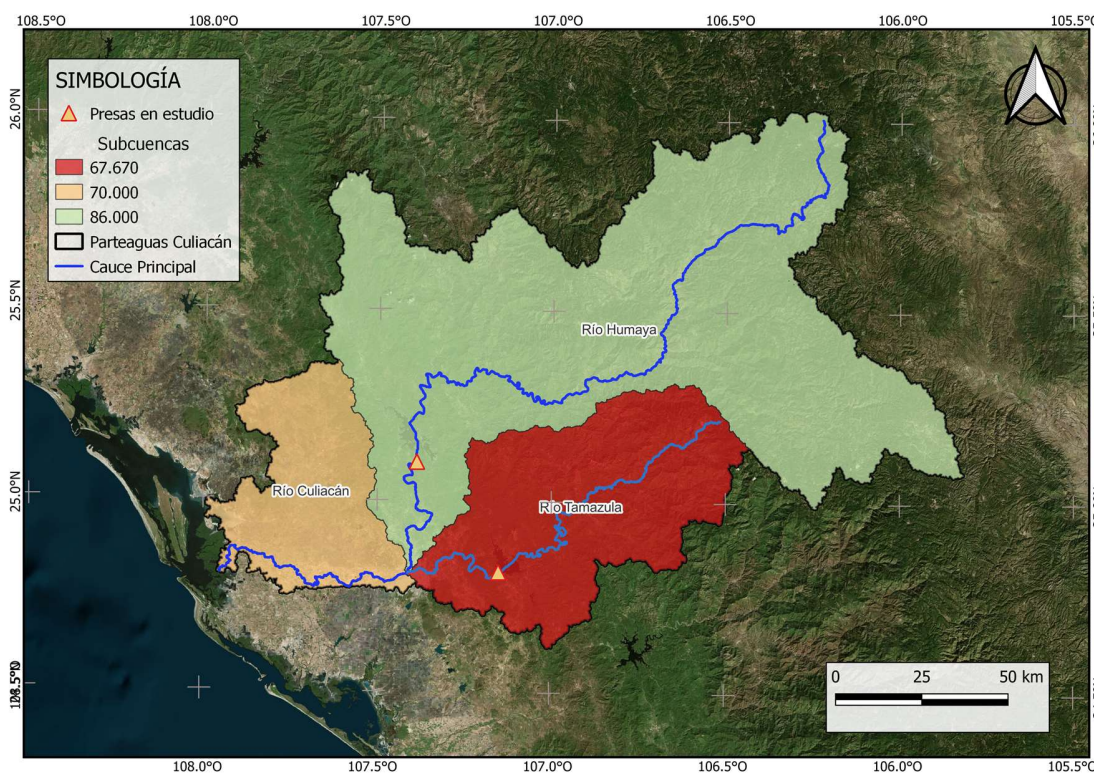


Ilustración 39 Índice de sitios propuestos en la cuenca del Río Culiacán

Respecto al índice de impacto ambiental (ilustración 40), las subcuencas del Río Culiacán y Humaya presentan el puntaje más alto debido al incremento en el consumo de agua, impulsado por el crecimiento urbano y uso agrícola. Este aumento en la actividad económica conlleva a una mayor demanda de recursos naturales, resultando en una disminución progresiva de la disponibilidad de

agua. También, a lo largo de los años, el número de incendios ha ido en aumento, afectando áreas urbanas, agrícolas y forestales. Paralelamente, se observa un creciente cambio en el uso de suelo, con expansión urbana y disminución en el área de las selvas.

Es importante mencionar que las áreas con veda de aprovechamiento de agua son prácticamente inexistentes, especialmente en las subcuencas Tamazula y Humaya. Esta situación es crítica, ya que dichas áreas son designadas para la protección y conservación de los recursos hídricos, sin embargo, la falta de regulación contribuye el deterioro de los cuerpos de agua sin contención del daño ambiental.

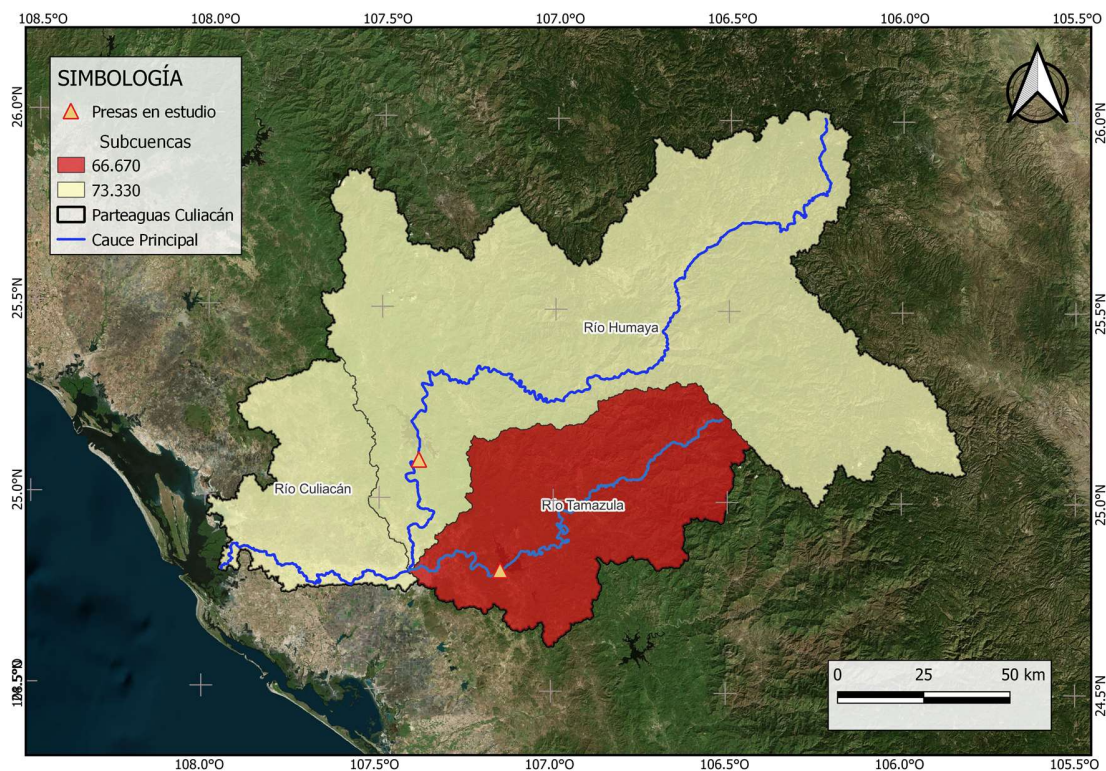


Ilustración 40 Índice de impacto ambiental en la cuenca del Río Culiacán

En resumen, la cuenca del Río Culiacán muestra una capacidad limitada para la conservación ambiental (ilustración 41). El signo negativo en el índice de conservación indica que el impacto ambiental supera los esfuerzos gubernamentales para conservar la biodiversidad. Las subcuencas del Río Tamazula y Humaya, aunque obtuvieron puntajes relativamente altos, carecen de suficientes instrumentos para garantizar la sostenibilidad de la biodiversidad y los recursos hídricos. En resumen, los resultados indican que la subcuenca del Río Tamazula es la más afectada, ya que los instrumentos de conservación son prácticamente inexistentes tanto en los índices prioritarios, así como en el índice de sitios con declaratoria. Con el paso del tiempo estas subcuencas han sido

afectadas y no cuentan con las medidas efectivas de mitigación, destacando la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación más efectivas para proteger la biodiversidad y los recursos hídricos.

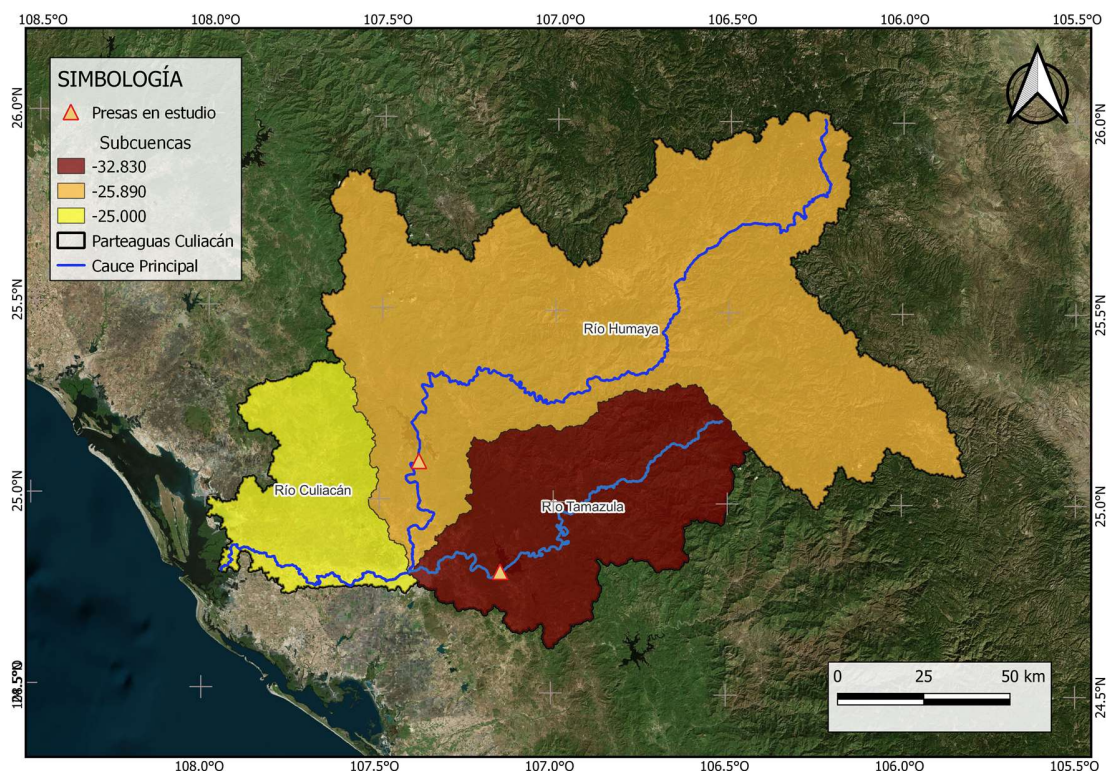


Ilustración 41 Conservación ambiental de la cuenca del Río Culiacán

El análisis detallado de la cuenca del Río Culiacán, mediante la EH 10018 Puente Sudpacífico, muestra una disminución de los caudales medios diarios a partir del año 1958, posterior a la construcción de la presa Adolfo López Mateos (gráfica 5), los caudales mensuales presentan un aumento en magnitud y una disminución en la variabilidad con picos significativos en ciertos años, los cuales son atribuidos sobre todo a la construcción de la presa Adolfo López Mateos. Se observó una estacionalidad marcada en los caudales de julio a septiembre y caudales mínimos de octubre a Julio.

Las pruebas estadísticas aplicadas confirman que hay una tendencia creciente en los caudales y un cambio significativo. Mediante la norma mexicana NMXN-AA-159-SCFI-2012 los resultados indican que la cuenca ha sido alterada respecto al régimen natural, ya que los caudales no se encuentran dentro del rango definido por los percentiles naturales en más del 50%.

Del análisis realizado mediante la metodología IHA, que evalúa varios parámetros hidrológicos antes y después del impacto, se observa que el caudal medio ha aumentado significativamente en

todos los meses (ilustración 45). El coeficiente de variación, tanto en el periodo anterior y posterior al impacto, muestra la dispersión relativa de los caudales. Todos los meses presentan una disminución de la variabilidad después de la alteración de la cuenca, lo que indica una estabilización del régimen hidrológico con caudales más altos y menos variables.

Los resultados sugieren que el régimen hidrológico se encuentra alterado, con un aumento significativo en la magnitud de los caudales en todos los meses y altas variaciones porcentuales. El programa IHA también identifica el caudal ecológico y sus cinco componentes: caudales bajos (flujo base del río), caudales extremadamente bajos (periodos de sequía), pulsos de caudal altos (cuando el río supera el caudal base sin llegar a causar inundación, y las pequeñas y grandes inundaciones. (The Nature Conservancy, 2009).

Además, en la ilustración 42 se presentan los registros de caudales diarios en la EH 10018, mostrando que antes de la construcción de la presa Adolfo López Mateos existían grandes y pequeñas inundaciones. Los resultados indican que, después de la alteración, el flujo se mantiene en pulsos de caudal alto, proporcionando buen acceso al agua para la biodiversidad la mayor parte del tiempo.

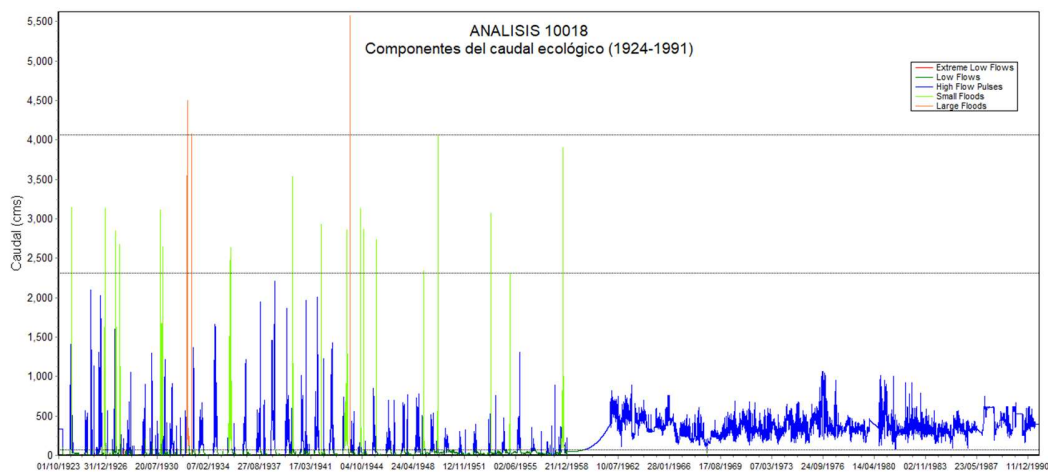


Ilustración 42 Registro de datos diarios y caudal ecológico.

El método IHA muestra los resultados para cada grupo de indicadores hidrológicos (tabla 5) , un ejemplo es la ilustración 43 que muestra el análisis de magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas del agua, determinando el máximo anual de 1 día en la EH 10018 Puente Sudpacífico, identifica claramente los dos periodos en estudio, es evidente el cambio drástico en los caudales máximos, antes del impacto los caudales eran variables y se presentaban grandes picos, después del impacto los caudales se estabilizaron a niveles más bajos y constantes, lo que indica que hubo un control en el río, esta estabilización puede indicar que después de la construcción hubo un mejor acceso al agua para las especies. La ilustración 44 muestra los resultados del análisis de los caudales máximos de 30 días en la misma estación, dividido en dos periodos, indicando que antes

del impacto hay un cambio fuerte que coincide con el año de construcción de la presa porque los caudales tienen alta variación presentando algunos caudales más altos que otros y después estos caudales lograron estabilizarse a niveles más bajos. Estos resultados muestran una visión sobre cómo se moderaron los caudales a lo largo del periodo, la ilustración destaca eventos más extremos individuales y eventos extremos suavizados en promedios sobre un mes, mostrando una visión más general.

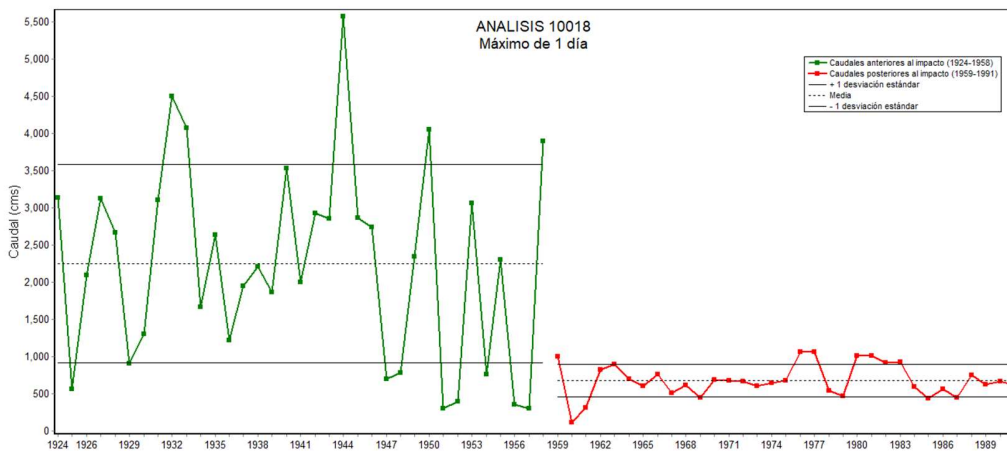


Ilustración 43 Caudal máximo de 1 día en EH 10018

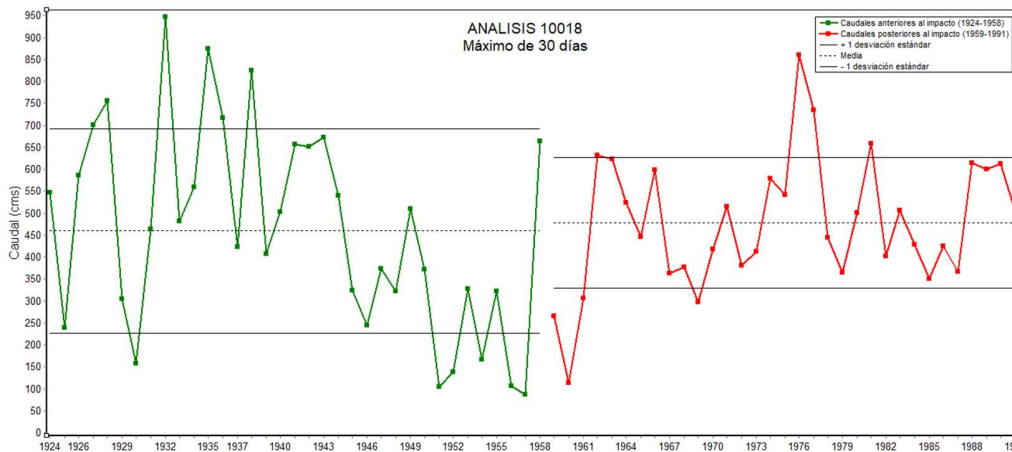


Ilustración 44 Caudal máximo de 30 días en EH 10018

Los resultados del método de la evaluación de la alteración hidrológica muestran que en muchas categorías se superan los límites esperados (ilustración 45), indicando alteración, ya que la mayoría de los parámetros muestran cambios significativos en la magnitud, variabilidad y frecuencia en el periodo alterado. El gráfico muestra el resultado de la alteración hidrológica después del impacto en

la E. H. 10018 (ilustración 46), clasificado en tres categorías alta (*High RVA category*), media (*Middle RVA category*) y baja (*Low RVA category*); en el grupo 1 se observa una alteración hidrológica alta para el mes de octubre en comparación con las categorías baja y media, en los meses de enero a septiembre se muestra una disminución en los valores de la alteración con algunas variaciones, aun así predominando la categoría alta en casi todos los meses. Respecto al grupo 2, los valores de alteración hidrológica muestran una alteración alta en los caudales máximos y mínimos, indicando una significativa variación en los caudales. En el grupo 3 también resulta notable más alta, indicando un cambio en la proporción del caudal base. Sin embargo, los valores de alteración altos también se observan en las fechas de días con caudal cero, sugiriendo un incremento en la frecuencia de días con caudal cero después de la construcción de la presa, en relación con las fechas de caudal mínimo y máximo la alteración es pronunciada en ambos parámetros, mostrando un cambio de temporalidad en los caudales. La duración y conteo de pulsos bajos y altos muestran valores altos especialmente en la duración y conteo de pulsos altos, la tasa de ascenso y descenso los valores de alteración también son altos indicando cambios en la rapidez con la que el caudal aumenta y disminuye.

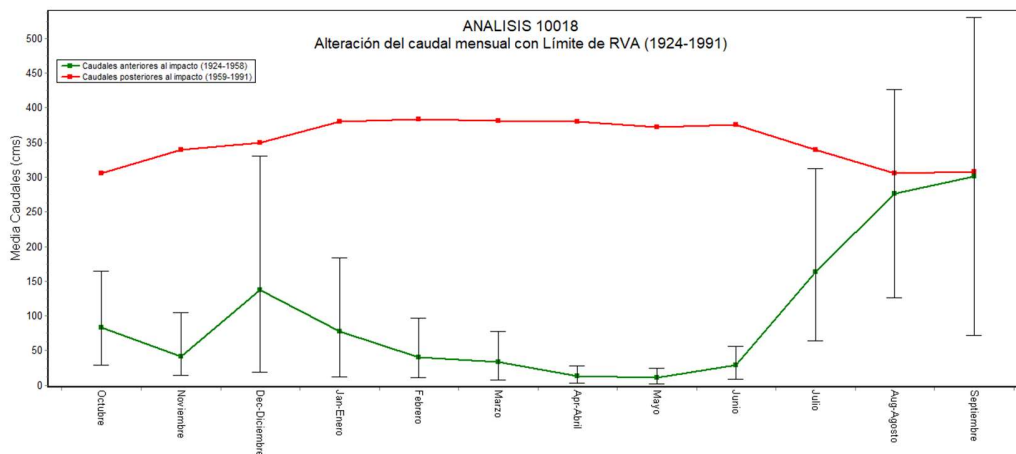


Ilustración 45 Alteración de caudal mensual en EH 10018

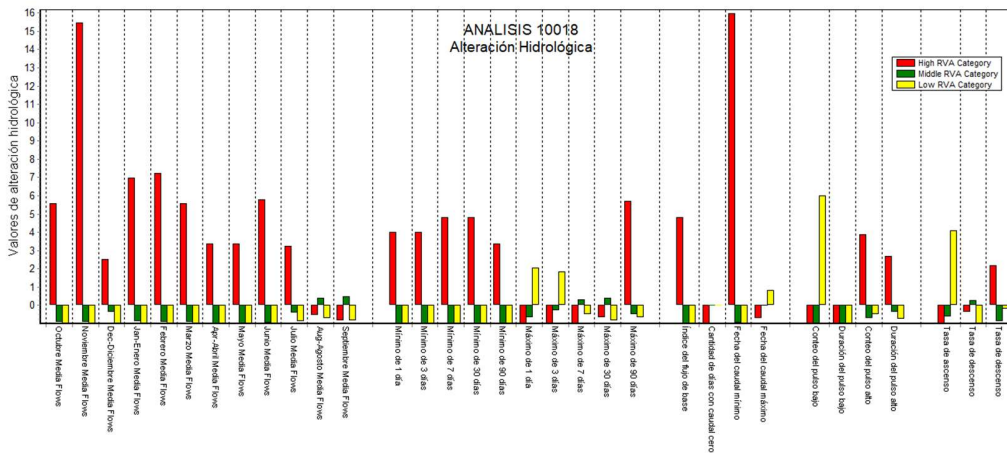
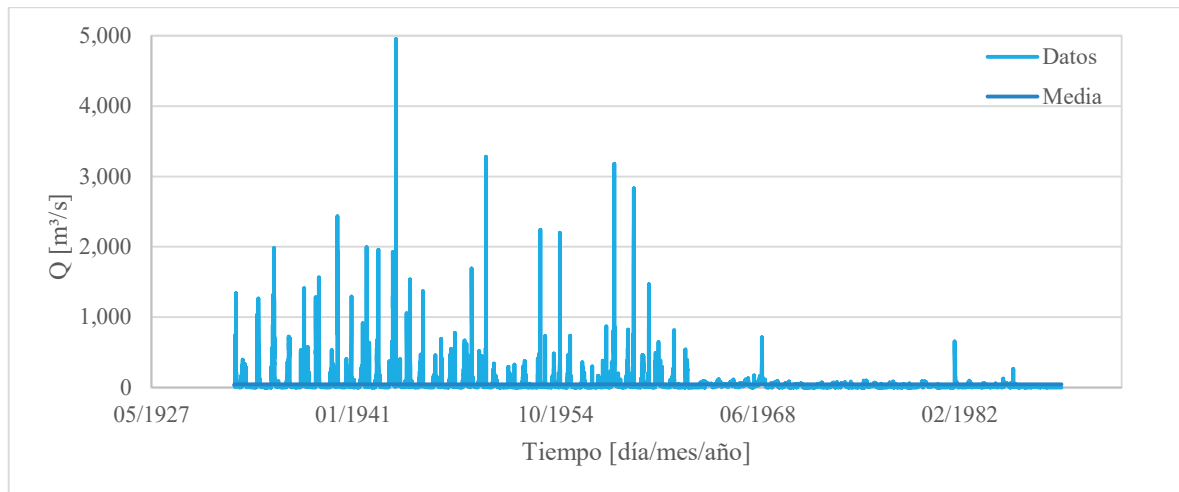


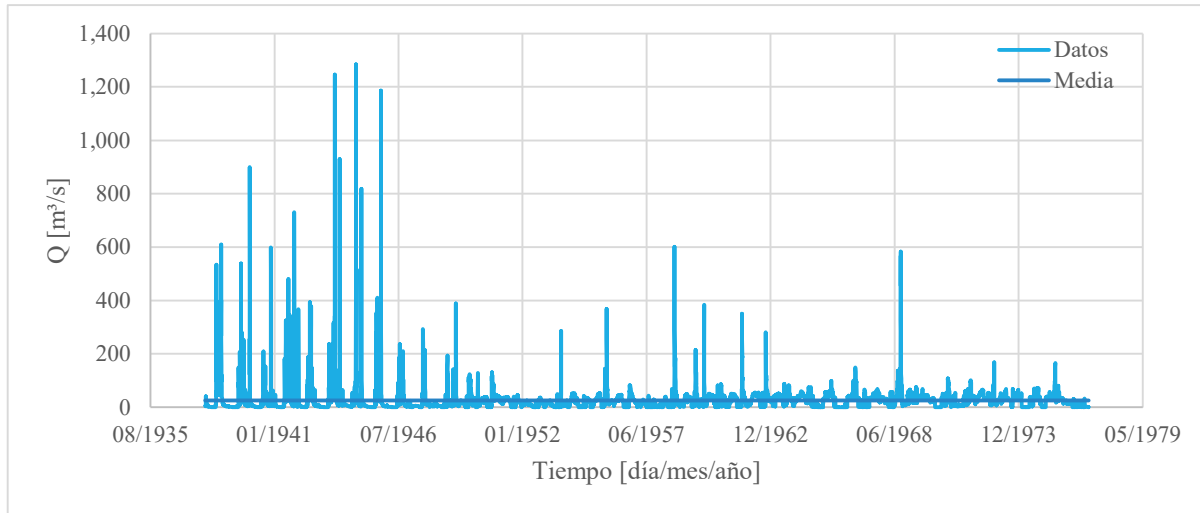
Ilustración 46 Factores de alteración hidrológica en EH 10018

En el caso de las EH 10033 Palos Blancos, está situada sobre el Río Culiacán aguas abajo de la presa Adolfo López Mateos. La estación fue diseñada para medir los escurrimientos del Río Humaya y posteriormente mide las salidas de la presa, tiene datos disponibles en los años 1938-1988 (gráfica 11). Por otro lado, la EH 10041 Sanalona I se sitúa sobre el Río Tamazula, aguas abajo de la presa Sanalona; tiene datos disponibles en los años 1944-1977 (gráfica 12), la estación mide las extracciones de la presa Sanalona. Los datos hidrométricos fueron obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS).



Gráfica 11 Registro de caudales medios diarios en la EH 10033 Palos Blancos

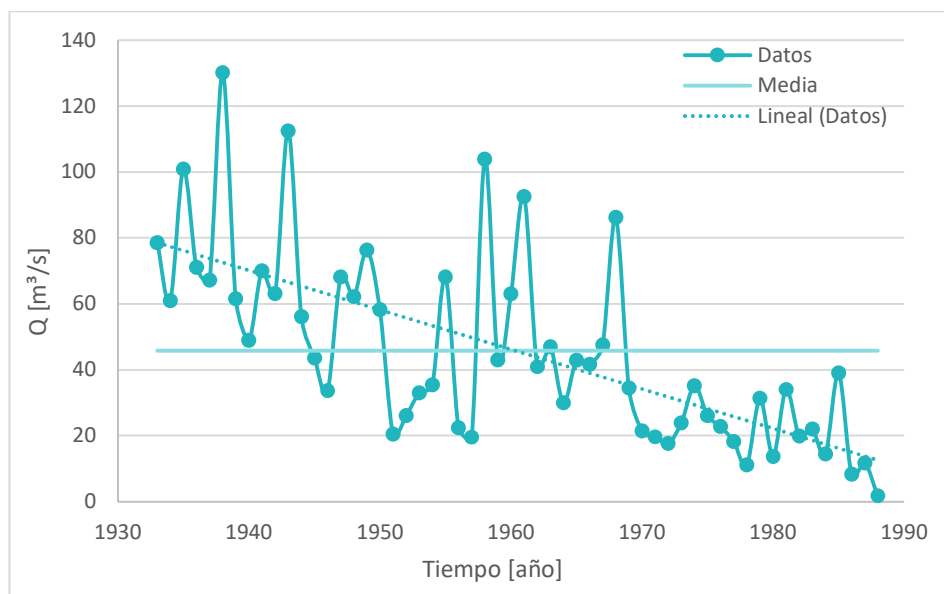
Gráfica 12 Registro de caudales medios diarios en la EH 10041 Sanalona I



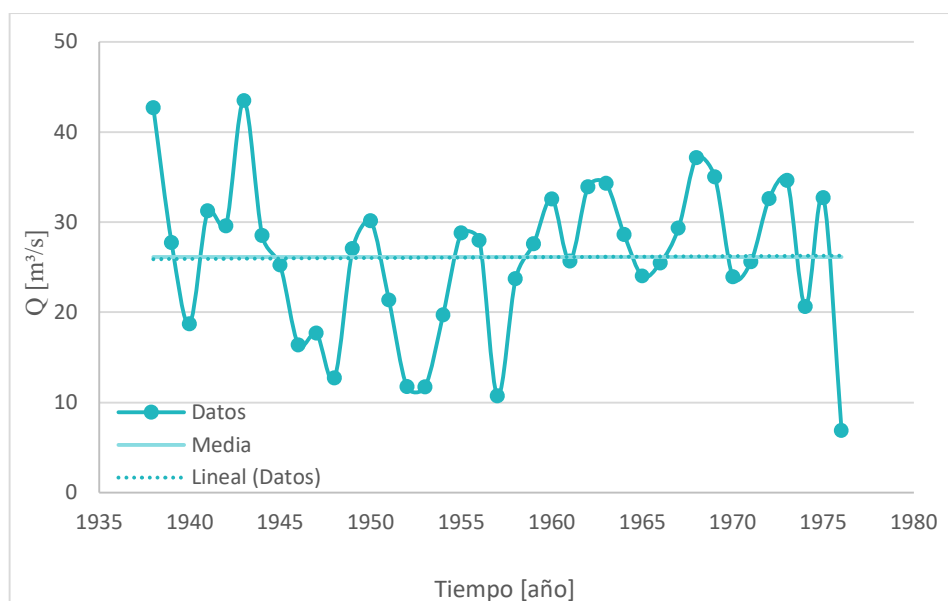
Mediante la gráfica 11 de caudales medios diarios la EH 10033 muestra un comportamiento similar a la EH 10018, ya que hay disminución de caudales a partir de la construcción de la presa Adolfo López Mateos. En cambio, en la EH 10041 (gráfica 12) se observa un cambio en el año 1949 identificando como el año en el que la presa Sanalona entró en operación.

Las pruebas estadísticas fueron aplicadas a ambas estaciones hidrométricas, la prueba de Mann Kendall muestra que la EH 10033 tiene una tendencia decreciente y la prueba Pettitt indica un cambio en el año 1968 con medias de 59.06 y 21.33 m³/s respectivamente, la regresión estadística lineal con pendiente de -1.136 m³/s/años (gráfica 13).

En el caso de la EH 10041 la prueba Mann Kendall no muestra una tendencia, esto quiere decir que los datos de caudales medios anuales no muestran un incremento o decremento a lo largo del tiempo y la prueba Pettitt identifica que en el año 1958 existe un cambio en el comportamiento de la serie (gráfica 14).



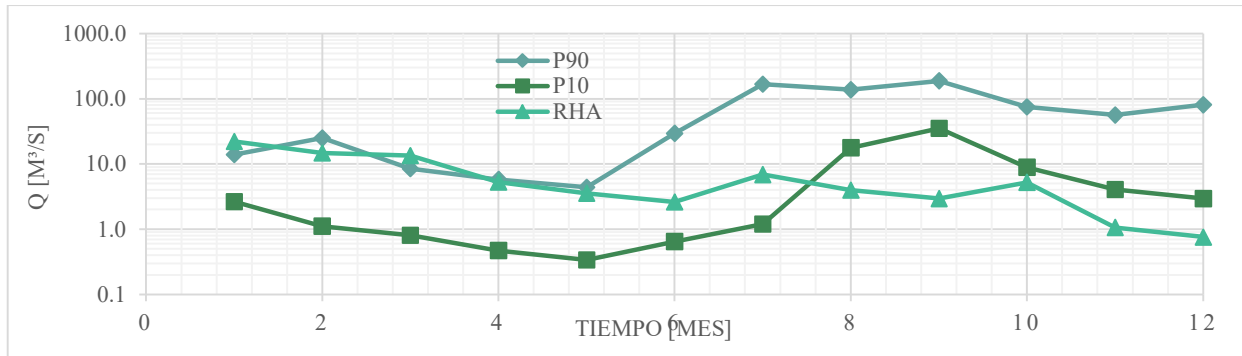
Gráfica 13 Tendencias en la EH 10033 Palos Blancos



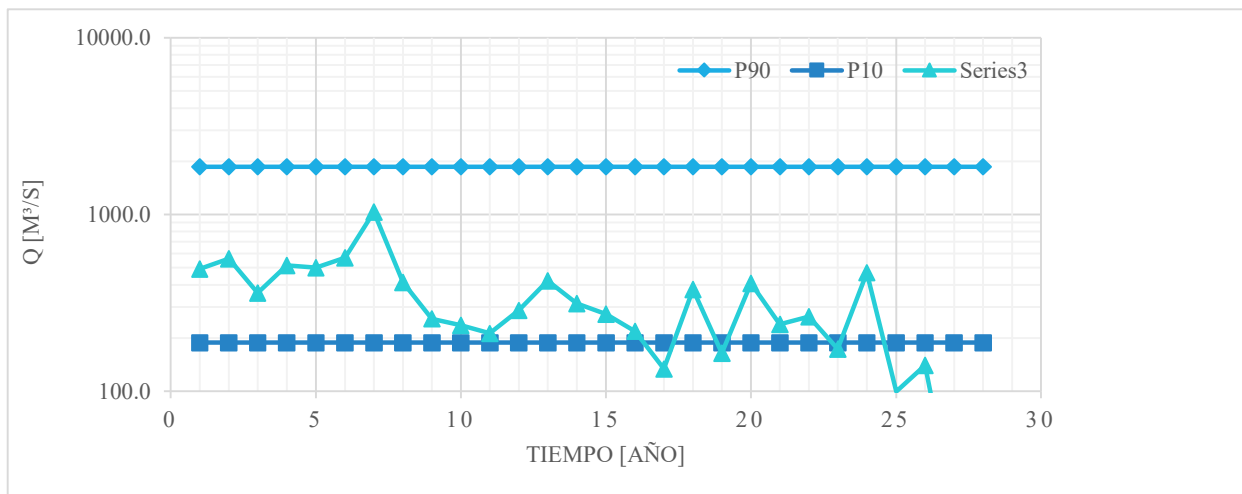
Gráfica 14 Tendencias en la EH 10041 Sanalona I

El análisis del apéndice B de la Norma Mexicana de caudales ecológicos, indica que la EH 10033 Palos Blancos el régimen hidrológico no se encuentra alterado ya que en la serie de caudales medios mensuales cumple con el 50% (gráfica 15, tabla 34) y los caudales medios anuales con el 77.8% (gráfica 16, tabla 35). De igual forma, los resultados indican que para la EH 10041 Sanalona I los

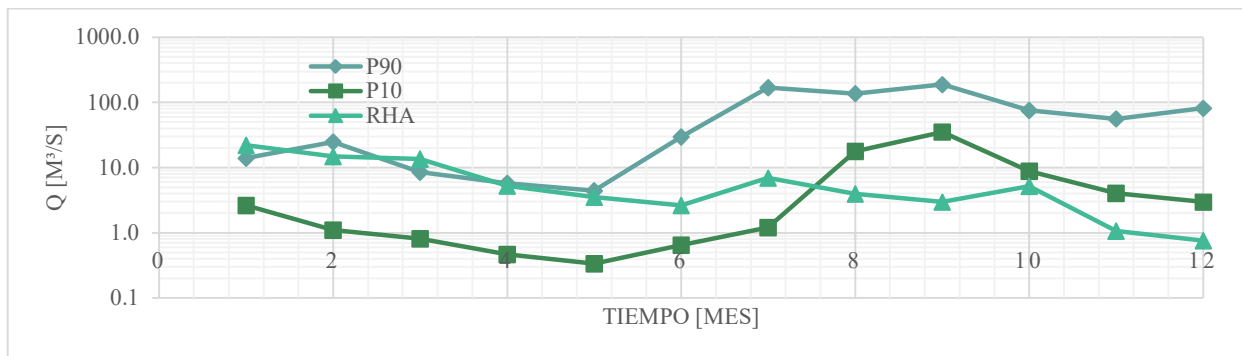
caudales medios mensuales cumplen con el 50.6% (gráfica 17, tabla 34) y los caudales medios anuales con el 96.4% (gráfica 18, tabla 35).



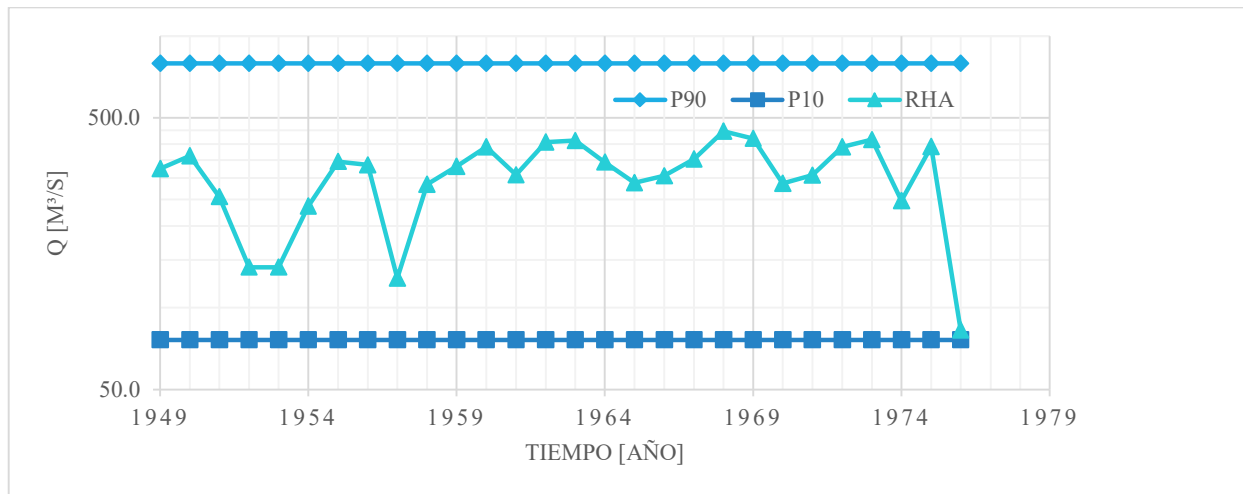
Gráfica 15 Régimen hidrológico mensual en EH 10033 Palos Blancos



Gráfica 16 Régimen hidrológico anual en EH 10033 Palos Blancos



Gráfica 17 Régimen hidrológico mensual EH 10041 Sanalona I



Gráfica 18 Régimen hidrológico anual EH 10041 Sanalona I

En el método IHA, el análisis indica que en la EH 10033 Palos Blancos tiene un comportamiento parecido a la EH 10018 Puente Sudpacífico ya que los caudales máximos antes del impacto eran de magnitud más grande y variables, después de la construcción de la presa Adolfo López Mateos identifica que los niveles de caudales disminuyeron drásticamente, lo que muestra una evidente alteración en el régimen hidrológico (ilustración 47, tabla 36). En la EH 10041, de igual forma, se obtiene un comportamiento similar a las EH anteriores, se identifica claramente que el año en el que comienza a operar la presa existe disminución de caudales, el aspecto importante en esta EH es que existe una variación importante en los caudales (ilustración 48, tabla 38).

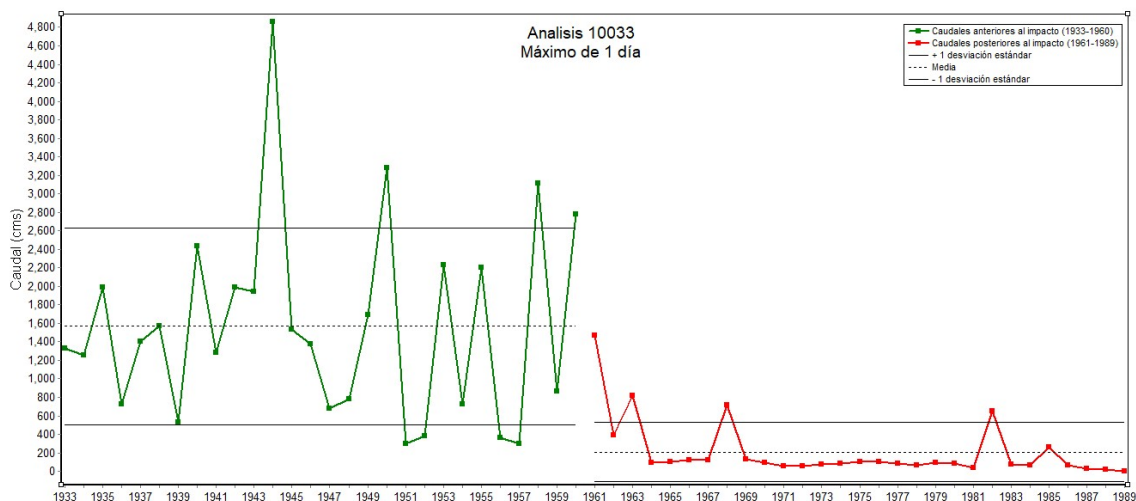


Ilustración 47 Caudales máximos de 1 día EH 10033 Palos Blancos

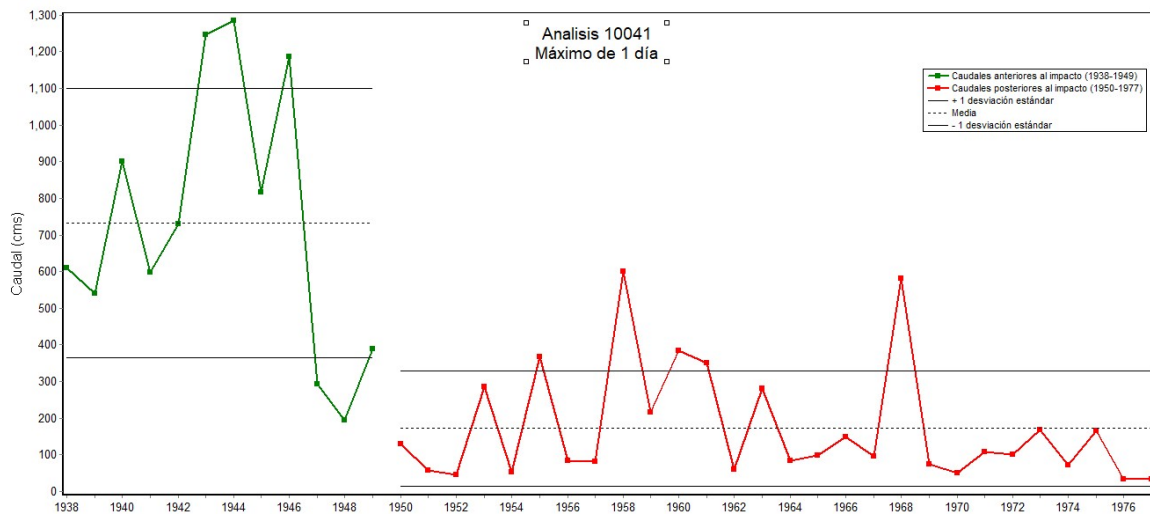


Ilustración 48 Caudales máximos de 1 día Eh 10041 Sanalona I

El método RVA indica que en la EH 10033 Palos Blancos, la mayoría de las categorías sobrepasan el límite establecido porque los parámetros muestran cambios principalmente en la categoría 2 de caudales mínimos y máximos representando alteraciones negativas en la magnitud, variabilidad y frecuencia de los caudales. En esta estación se observa una alteración alta en los meses de abril y mayo en las categorías altas (ilustración 49). El método RVA establece límites en los objetivos preliminares con la gestión del flujo en procesos de cambio de régimen hidrológico, en la ilustración 48 se identifica que hubo una alteración en el flujo después de la construcción de la presa, lo que ocasionó que en algunos meses desde julio, agosto y septiembre no se cumplan las metas establecidas para que la integridad del ecosistema se mantenga en buenas condiciones (tabla 37).

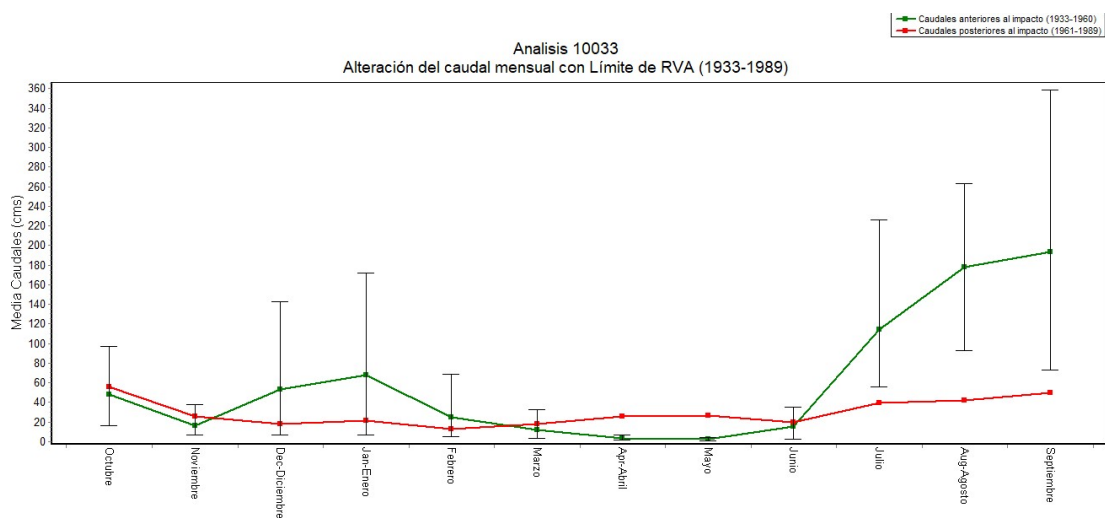


Ilustración 49 Alteración del caudal mensual en EH 10033





IV. Conclusiones

Este trabajo se desarrolló una propuesta basada en métodos ecohidrológicos para determinar el grado de conservación de la cuenca del Río Culiacán que consistió en evaluar la condición de conservación de las subcuencas que conforman al Río Culiacán mediante el análisis de distintas variables ambientales, después se aplicó un método hidrológico de caudal ecológico que indica la alteración del régimen y también se utilizaron las metodologías IHA y RVA para caracterizar el régimen del flujo aguas abajo de las presas en estudio. En el estudio se utilizaron 3 estaciones hidrométricas, la primera EH 10018 Puente Sudpacífico que es la representativa de la cuenca del Río Culiacán porque se encuentra aguas abajo de las dos presas en estudio; la EH 10033 Palos blancos situada aguas abajo de la presa Adolfo López Mateos y la EH 10041 Sanalona que se encuentra aguas abajo de la presa Sanalona.

A partir de los resultados obtenidos, entre ellos los índices ambientales, se concluye que la cuenca del Río Culiacán se encuentra fuertemente alterada. Los instrumentos políticos actuales para proteger la integridad del ecosistema ya no son suficientes, el impacto generado supera los esfuerzos realizados para restaurar la biodiversidad. Es importante identificar y designar áreas de alto valor ecológico, especialmente en las subcuencas del Río Tamazula y Humaya, para proporcionar una protección legal a la biodiversidad presente, ya que resultó la subcuenca más afectada.

Es una necesidad fortalecer los instrumentos de conservación que existen en la cuenca, ya que muchos de ellos requieren una actualización acorde a las fechas de su establecimiento, muchos de los instrumentos políticos no han tenido una actualización desde hace mucho tiempo. Además, es necesario desarrollar planes de manejo para asegurar la revisión y actualización periódica por parte de las autoridades. Un plan de manejo actualizado y adecuado no solo mejorará la capacidad de conservación de la cuenca, sino que también va a contribuir con una gestión más sostenible de los recursos hídricos y la biodiversidad. Establecer el índice de conservación ambiental de la cuenca ha proporcionado una visión más clara sobre las necesidades del ecosistema y esto permite plantear acciones inmediatas tanto por parte de las comunidades como de las autoridades.

A partir de un análisis detallado en la E.H 10018 Puente Sudpacífico presentando resultados generales para la cuenca del Río Culiacán, se observó que existen alteraciones significativas respecto a la alteración hidrológica ocasionada por la construcción de la presa Adolfo López Mateos en 1960, mostrando en los datos una disminución en los registros de caudales diarios, atribuible a la infraestructura hidráulica, por lo que ha ejercido un control sobre el flujo porque disminuyeron las inundaciones y se estabilizaron los caudales. En el caso de los caudales mensuales se presentó un aumento en magnitud, disminución de la variabilidad y una estacionalidad bien definida comenzando de octubre a julio, ayudando a definir el periodo de lluvias, según resultados del programa IHA. Las pruebas estadísticas confirmaron una tendencia creciente de los caudales medios y mediante la norma mexicana se observó que la cuenca ha sido alterada respecto a su régimen



natural ya que más del 50% de los caudales no se encuentran dentro del rango de los percentiles establecidos.

La metodología IHA muestra resultados en donde se indica que existe una alteración hidrológica significativa, ya que en muchas categorías se superaron los límites esperados, lo que implica cambios en la magnitud, variabilidad y frecuencia en el periodo alterado.

Las alteraciones en el régimen hidrológico tienen fuertes consecuencias en el ecosistema como la alteración del ciclo de vida de los organismos en general afectando la biodiversidad y salud de los ecosistemas acuáticos, cambiando la estructura y función del hábitat en el río, alterando el ciclo de vida de las especies dependientes natural del agua como los peces y plantas.

La construcción de la presa Adolfo López Mateos ha tenido un impacto importante en el régimen hidrológico del Río Culiacán, debido al gran volumen de la presa, resultando en una estabilización y cambios en la variación de los caudales. Las consecuencias de estos cambios son modificaciones en las condiciones ecológicas del río, afectando los caudales altos y bajos, alterando la temporalidad y frecuencia de los eventos del flujo. En el caso de la presa Sanalona no se observaron cambios, la modificación se presentó años más adelante.



V. Referencias

- [1]. Agua.org.mx. (2019). *Cuencas hidrográficas*. Obtenido de <https://agua.org.mx/que-es-una-cuenca/#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20se%20han%20delimitado,en%2013%20regiones%20econ%C3%B3mico-administrativas>.
- [2]. Alfredo, O., Pinkus-Rendón, M. J., & Espitia-Moreno, I. C. (s.f.). *Las áreas naturales protegidas y la investigación científica en México*. Obtenido de <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/1032/1/PUB-CAPITULOS-LIBROS-965.PDF>
- [3]. Aparicio, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- [4]. Aragón, J. L. (2022). Efecto de presas sobre el régimen de flujo. Caso de estudio completos. *XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- [5]. Arriaga, L., Aguilar, V., & Alcocer, J. (2000). *Aguas continentales y diversidad biológica de México*. México: Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
- [6]. Barradas Solorio, V. (2021). *Caracterización y evaluación de los escurrimientos que desembocan al Golfo de California*. Tesis Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- [7]. Bezaury, J. E., Ochoa, F., & María O. Llano Blanco, C. L. (2017). *Agua dulce conservación de la biodiversidad, protección de los servicios ambientales y restauración ecológica en México*. México.
- [8]. Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- [9]. Cantú, C., Uvalle Saucedo, J., Saldivar, G., & F, H. F. (2018). Evaluación del grado de conservación de las cuencas hidrográficas de Nuevo León. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*.
- [10]. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (08 de Mayo de 2023). *Áreas Naturales Protegidas*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conanp/documentos/areas-naturales-protegidas-278226>
- [11]. Comisión Nacional del Agua. (Marzo de 2006). *El agua en México*. Obtenido de <https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/el-agua-en-mexico.pdf>



- [12]. Comisión Nacional del Agua. (2008). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México.
- [13]. Comisión Nacional Forestal. (02 de Febrero de 2018). *Humedales, invaluable ecosistemas*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conafor/articulos/humedales-invaluables-ecosistemas#:~:text=M%C3%A9xico%20alberga%20142%20sitios%20Ramsar%2C%20es%20el%20segundo%20lugar%20a%20nivel%20mundial&text=De%20las%20225%20millones%20418,20%20mil%20especies%20de%20aves>.
- [14]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (17 de Octubre de 2023). *Regiones hidrológicas prioritarias*. Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/regiones-hidrologicas-prioritarias-de-mexico>
- [15]. Diario Oficial de la Federación . (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Culiacán (2504), Estado de Sinaloa*. Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sinaloa/DR_2504.pdf
- [16]. Escalante, C. A., & Reyes, L. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología*. Facultad de Ingeniería.
- [17]. Espinosa, I. A., & Roberto, Z. (Enero de 2009). *Ecohidrología*. Obtenido de XIX Congreso Nacional de Hidráulica : https://www.researchgate.net/publication/273760370_Ecohidrologia
- [18]. González, R., & Banderas, A. (2015). Metodologías para el cálculo de caudales ecológicos y ambientales en ríos regulados por presas. *IMTA*, 276.
- [19]. Hernández González, L. (2022). *Análisis espacio-temporal de variables climatológicas en la cuenca del río Piaxtla*. Tesis licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- [20]. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (01 de Agosto de 2019). *¿Qué es una cuenca?* Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- [21]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Presas*. Obtenido de <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/presas.aspx#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20existen%20m%C3%A1s%20de,el%20norte%20de%20la%20Rep%C3%BAblica>.
- [22]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Población rural y urbana*. Obtenido de https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20INEGI,viven%20m%C3%A1s%20de%202%2C500%20personas.



- [23]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía-Instituto Nacional de Ecología-Comisión Nacional del Agua. (2007). *Documento de cuencas hidrográficas de México*.
- [24]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2005). Guía para la interpretación de cartografía.
- [25]. Kendall, M. (1975). Rank correlation methods. *Charles Griffin*, 120.
- [26]. Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.
- [27]. Morales Peña, M. *Evaluación del caudal ecológico en cuencas que descargan al Golfo de California*. Tesis Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- [28]. Pettitt, A. (1979). A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Royal Statistical Society* , 126-135.
- [29]. Qingting, Z., & Shikui, L. (s.f.). Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA. *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*.
- [30]. Ramsar. (2024). *La convección sobre los humedales*. Obtenido de <https://www.ramsar.org/es>
- [31]. Richte, B., Baumgartner, J., Braun, D., & Powel, J. (1998). A spatial assement of hydrologic alteration within a river network. *Regulated rivers: Research & Management*.
- [32]. Richter, B., Baumgartner, J., & Braun, D. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*.
- [33]. Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., & Braun, D. (1996). A Method for Assessing Hydrologyc Alteration within Ecosystems. *Wiley for Society for Conservation*, 1163-1174.
- [34]. Salinas, S. (25 de febrero de 2021). *Caudales ecológicos climáticamente resilientes: Desafíos de evaluación e implementación inteligente*. Obtenido de [Video]. Facebook: <https://www.facebook.com/EcosurVillahermosa/videos/428513091688650>
- [35]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2002). *Suelos*. Obtenido de Compendio de estadísticas ambientales: https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/03_Suelos/3.1_Suelos/index.htm
- [36]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (30 de septiembre de 2018). Obtenido de Importancia de las UMAS: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/las-umas-sitios-dedicados-a-la-conservacion-de-la-vida-silvestre>



- [37]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Atlas digital geográfico*. Obtenido de <https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/biodiversidad.html>
- [38]. The Nature Conservancy. (2009). Indicadores de alteración hidrológica. *Manual de usuario* (Versión 7.1).
- [39]. Toledo, A. (2006). *Agua, hombre y paisaje*. México.
- [40]. UNESCO. (2018). Ecohidrología, una ciencia integral desde escala molecular hasta escala de cuencas. *Programa Hidrológico Internacional*.
- [41]. UNESCO. (2018). Ecohidrología, una ciencia integral desde escala molecular hasta escala de cuencas: evolución histórica, avances y actividades de implementación. 28.
- [42]. USGS. (2019). *El ciclo del agua-The water Cycle, Spanish*. Obtenido de [https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish#:~:text=El%20ciclo%20del%20agua%20describe%20d%C3%B3nde%20est%C3%A1%20el%20agua%20en,dulce%20o%20salina%20\(salada\)](https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish#:~:text=El%20ciclo%20del%20agua%20describe%20d%C3%B3nde%20est%C3%A1%20el%20agua%20en,dulce%20o%20salina%20(salada))
- [43]. WWF. (2024). *¿Por qué es importante que los ríos fluyan libremente?* Obtenido de <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/por-que-es-importante-que-los-rios-fluyan-libremente#:~:text=Los%20r%C3%ADos%20fluyen%20libremente%20cuando,naturales%20pueden%20desplazarse%20sin%20obst%C3%ACulos>.
- [44]. Zalewski, M. (2002). *Ecohydrology—the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources /Ecohydrologie—la prise en compte de processus écologiques et hydrologiques pour la gestion durable des ressources en eau*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626660209492986?needAccess=true>



VI. Anexos

A. Apéndice B

Tabla 34 Régimen hidrológico mensual

MENSUAL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
EH 10033 Palos Blancos (Aguas abajo de Adolfo López Mateos)												
Percentil 10	4.4	3.2	2.7	1.5	1.0	2.0	40.4	83.7	34.3	7.5	3.5	4.0
Percentil 90	234.1	75.3	38.0	6.7	3.9	60.4	211.9	337.2	517.9	156.0	39.1	179.1
Cumple	21	17	17	4	2	23	10	2	13	19	15	19
Datos totales	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
% que cumple	77.8	63.0	63.0	14.8	7.4	85.2	37.0	7.4	48.1	70.4	55.6	70.4
% que cumple: 50.0 CUENCA NO ALTERADA												
EH 10041 Sanalona I (Aguas abajo de Sanalona)												
Percentil 10	2.6	1.1	0.8	0.5	0.3	0.6	1.2	17.8	35.3	8.8	4.1	3.0
Percentil 90	14.0	24.9	8.5	5.8	4.4	29.5	168.3	137.2	188.6	75.3	56.2	81.4
Cumple	7	13	5	1	1	12	25	16	14	27	26	23
Datos totales	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
% que cumple	25.0	46.4	17.9	3.6	3.6	42.9	89.3	57.1	50.0	96.4	92.9	82.1
% que cumple: 50.6 CUENCA NO ALTERADA												

Tabla 35 Régimen hidrológico anual

ANUAL	DATOS
Percentil 10	261.9
Percentil 90	2933.8
Caudal medio anual	21.8
Caudal medio anual	244.5
Cumple	1
Datos totales	31
% que cumple	3.2
CUENCA NO ALTERADA	
Percentil 10	261.9
Percentil 90	2933.8
Caudal medio anual	21.8
Caudal medio anual	244.5
Cumple	1
Datos totales	31
% que cumple	3.2
CUENCA NO ALTERADA	



B. Método IHA y RVA

EH 10033 Palos Blancos

Tabla 36 Resultados IHA EH 10033 Palos Blancos

	MEDIAS		COEF. de VAR.		FACTOR DE DESVIACIÓN		DESV. del C.V.	
	Anterior	Posterior	Anterior	Posterior	Magnitud	%	Magnitud	%
Grupo 1								
Oct	48.0	55.6	1.0	1.1	7.5	15.7	0.0	3.7
Nov	16.3	25.9	1.3	1.1	9.6	58.7	-0.3	-20.5
Dec	52.9	17.9	1.7	1.0	-35.0	-66.1	-0.7	-40.9
Jan-	67.6	21.2	1.5	1.7	-46.4	-68.7	0.2	12.7
Feb	24.5	13.1	1.8	1.1	-11.4	-46.5	-0.7	-37.3
Mar	12.3	18.3	1.6	1.1	6.0	48.8	-0.5	-33.4
Apr	3.5	25.8	0.8	0.8	22.2	625.4	0.1	7.3
May	2.2	26.8	0.6	0.8	24.7	1142.0	0.1	23.7
Junio	15.8	19.5	1.2	0.8	3.7	23.4	-0.4	-36.4
Julio	114.0	39.5	1.0	1.4	-74.5	-65.3	0.4	42.3
Ago	178.2	41.9	0.5	1.5	-136.3	-76.5	1.0	217.1
Sep	193.7	50.2	0.9	1.3	-143.5	-74.1	0.4	48.2
Grupo 2								
1-día mínimo	1.2	0.9	0.6	1.8	-0.3	-27.0	1.2	188.0
3-días mínimo	1.3	1.0	0.6	1.7	-0.3	-22.3	1.1	174.8
7-días mínimo	1.3	1.2	0.6	1.5	-0.1	-10.4	0.9	153.1
30-días mínimo	1.6	2.6	0.5	1.2	1.0	62.5	0.6	120.1
90-días mínimo	2.9	6.8	0.7	1.1	3.9	135.2	0.4	62.6
1-día máximo	1,568.0	209.8	0.7	1.5	-1358.0	-86.6	0.8	125.1
3-días máximo	1,036.0	172.3	0.7	1.3	-864.0	-83.4	0.7	98.4
7-días máximo	652.2	151.1	0.6	1.3	-501.2	-76.8	0.7	112.1
30-días máximo	307.8	89.5	0.5	0.9	-218.3	-70.9	0.4	88.4
90-días máximo	171.4	62.4	0.6	0.8	-108.9	-63.6	0.3	52.0
No. días cero caudales	0.0	0.0	0.0	0.0				
Índice caudal base	0.0	0.1	0.5	2.1	0.1	235.0	1.6	299.0
Grupo 3								
Fecha de caudal mín	160.4	116.7	0.0	0.2	43.7	23.9	0.2	695.2
Fecha de caudal máx	204.5	249.9	0.3	0.2	45.4	24.8	-0.2	-44.8
Grupo 4								
Conteo pulsos bajos	2.5	5.4	0.7	0.7	2.9	117.9	0.0	1.8
Duración pulsos bajo	49.5	25.8	0.6	1.3	-23.7	-47.9	0.7	106.4
Conteo pulsos altos	6.5	0.8	0.5	2.9	-5.7	-87.7	2.4	500.2
Duración pulsos alto	3.8	7.4	0.8	0.8	3.6	95.7	0.0	0.9
Umbral de pulso bajo	3.8							
Umbral de pulso alto	223.2							
Grupo 5								
Tasa de subida	51.5	6.4	0.5	1.8	-45.1	-87.5	1.2	229.0
Tasa de bajada	-19.3	-3.6	-0.5	-1.0	15.7	-81.4	-0.5	92.4
Número de reversas	85.5	98.8	0.2	0.3	13.3	15.6	0.1	32.8

Tabla 37 Resultados RVA EH 10033 Palos Blancos

t	Pre: 1924-1958		Post: 1959-1991		Límites de RVA		AH				
	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Bajo	Alto	(Cat. media)
Grupo 1											
Oct	48.0	1.0	6.5	190.3	55.6	1.1	1.0	241.2	16.6	96.9	0.0
Nov	16.3	1.3	3.2	113.0	25.9	1.1	0.5	110.8	6.7	38.0	-0.2
Dic	52.9	1.7	3.4	374.0	17.9	1.0	1.2	69.7	6.6	142.8	-0.1
Ene	67.6	1.5	3.8	360.2	21.2	1.7	0.5	195.8	7.4	171.9	0.1
Feb	24.5	1.8	1.9	223.2	13.1	1.1	0.4	58.6	4.8	68.9	-0.1
Mar	12.3	1.6	2.2	82.3	18.3	1.1	0.2	70.6	3.0	32.5	-0.2
Abr	3.5	0.8	1.4	15.3	25.8	0.8	0.1	63.7	1.9	6.3	-0.8
May	2.2	0.6	0.7	7.5	26.8	0.8	0.1	65.7	0.8	3.5	-0.8
Jun	15.8	1.2	1.4	63.8	19.5	0.8	0.0	52.4	2.6	35.0	0.0
Jul	114.0	1.0	19.2	621.0	39.5	1.4	0.8	247.5	55.7	226.8	-0.7
Ago	178.2	0.5	68.5	381.9	41.9	1.5	1.2	284.5	93.0	263.4	-0.9
Sep	193.7	0.9	32.6	544.5	50.2	1.3	1.3	270.9	73.5	358.7	-0.6
Grupo 2											
1-día mínimo	1.2	0.6	0.2	4.2	0.9	1.8	0.0	8.6	0.4	2.0	-0.6
3-días mínimo	1.3	0.6	0.2	4.2	1.0	1.7	0.0	8.6	0.5	2.0	-0.5
7-días mínimo	1.3	0.6	0.3	4.3	1.2	1.5	0.0	8.7	0.5	2.1	-0.5
30-días mínimo	1.6	0.5	0.7	4.7	2.6	1.2	0.0	11.9	0.8	2.5	-0.4
90-días mín.	2.9	0.7	1.1	8.8	6.8	1.1	0.1	28.6	1.7	4.8	-0.4
1-día máx.	1,568.0	0.7	297.9	4,860.0	209.8	1.5	1.5	1,467.0	505.3	2,631.0	-0.8
3-días máximo	1,036.0	0.7	176.7	2,977.0	172.3	1.3	1.5	841.2	339.4	1,733.0	-0.8
7-días máximo	652.2	0.6	109.0	1,440.0	151.1	1.3	1.5	691.1	267.9	1,037.0	-0.8
30-días máximo	307.8	0.5	83.5	624.3	89.5	0.9	1.5	296.7	162.3	453.3	-0.8
90-días máximo	171.4	0.6	43.4	486.0	62.4	0.8	1.5	224.5	76.6	266.1	-0.8
No. de días con caudal cero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Índice caudal base	0.0	0.5	0.0	0.1	0.1	2.1	0.0	0.9	0.0	0.0	-0.6
Grupo 3											
Fecha de caudal mín.	160.4	0.0	138.0	176.0	116.7	0.2	28.0	346.0	149.6	171.2	-0.9
Fecha de caudal máx.	204.5	0.3	1.0	360.0	249.9	0.2	21.0	366.0	80.8	328.2	0.7
Grupo 4											
Conteo pulsos bajos	2.5	0.7	0.0	6.0	5.4	0.7	0.0	13.0	0.8	4.2	-0.5
Duración pulsos bajo	49.5	0.6	9.2	123.0	25.8	1.3	0.0	154.8	18.3	80.7	-0.7
Conteo pulsos altos	6.5	0.5	1.0	14.0	0.8	2.9	0.0	11.0	3.4	9.6	-0.9
Duración pulsos alto	3.8	0.8	1.0	13.3	7.4	0.8	0.0	14.0	1.8	6.7	-0.9
El umbral de pulso bajo es			3.8								
El umbral de pulso alto es			223.2								
Grupo 5											
Tasa de subida	51.5	0.5	9.6	128.9	6.4	1.8	0.0	57.4	24.0	79.1	-0.9
Tasa de bajada	-19.3	-0.5	-51.2	-4.0	-3.6	-1.0	-19.7	-0.4	-29.6	-8.9	-0.9
Número de reversas	85.5	0.2	58.0	131.0	98.8	0.3	0.0	139.0	65.9	105.0	-0.4



EH 10041 Sanalona I

Tabla 38 Resultados IHA EH 10041 Sanalona I

	MEDIAS		COEF. de VAR.		FACTOR DE DESVIACIÓN		DESV. del C.V.	
	Anterior	Posterior	Anterior	Posterior	Magnitud	%	Magnitud	%
Grupo 1								
Oct	23.45	38.26	0.9091	0.5292	14.81	63.17	-0.3799	-41.79
Nov	13.36	25.14	1.281	0.5291	11.79	88.24	-0.7524	-58.71
Dec	23.86	17.89	1.174	0.6452	-5.967	-25.01	-0.5284	-45.02
Jan-	12.3	15.64	1.397	0.8132	3.345	27.21	-0.5842	-41.81
Feb	7.277	18.9	1.13	0.7275	11.62	159.7	-0.4023	-35.61
Mar	3.371	23.31	0.8321	0.6939	19.94	591.4	-0.1382	-16.61
Apr	3.664	26.21	1.636	0.7146	22.55	615.4	-0.9211	-56.31
May	3.107	28.32	1.983	0.5912	25.22	811.6	-1.392	-70.19
Junio	8.689	24.36	1.148	0.6224	15.67	180.4	-0.5254	-45.77
Julio	43.64	18.47	1.184	1.011	-25.17	-57.67	-0.1722	-14.55
Ago	84.07	22.79	0.4271	0.9175	-61.28	-72.89	0.4905	114.9
Sep	89.99	41.77	0.5459	0.9065	-48.22	-53.58	0.3606	66.05
Grupo 2								
1-día mínimo	0.335	0.8794	1.487	1.983	0.5444	162.5	0.4961	33.35
3-días mínimo	0.3421	1.331	1.45	1.951	0.9888	289	0.5007	34.53
7-días mínimo	0.3553	1.658	1.387	1.916	1.303	366.6	0.529	38.15
30-días mínimo	0.6307	3.416	1.262	1.371	2.785	441.6	0.1087	8.608
90-días mínimo	1.945	7.874	1.426	0.9368	5.928	304.7	-0.4889	-34.29
1-día máximo	732.4	172.1	0.501	0.9154	-560.3	-76.51	0.4144	82.72
3-días máximo	419.2	140.3	0.3922	0.9418	-278.9	-66.53	0.5496	140.1
7-días máximo	269.7	109	0.3256	0.8142	-160.7	-59.58	0.4886	150.1
30-días máximo	126.8	63.09	0.386	0.4983	-63.71	-50.24	0.1123	29.09
90-días máximo	74.39	42.09	0.4983	0.4047	-32.3	-43.41	-0.09354	-18.77
No. días cero caudales	0	0	0	0				
Índice caudal base	0.01233	0.07243	1.181	1.956	0.0601	487.5	0.7747	65.61
Grupo 3								
Fecha de caudal mín	156.3	174.8	0.0882	0.2321	18.42	10.06	0.1439	163.2
Fecha de caudal máx	263	251	0.2438	0.1741	11.96	6.538	-0.06968	-28.59
Grupo 4								
Conteo pulsos bajos	3	6.714	1.101	0.7911	3.714	123.8	-0.3099	-28.15
Duración pulsos bajo	59.36	31.27	0.7732	2.272	-28.09	-47.32	1.499	193.8
Conteo pulsos altos	8.083	0.9643	0.4102	1.213	-7.119	-88.07	0.8032	195.8
Duración pulsos alto	3.418	6.963	0.2786	1.025	3.544	103.7	0.7468	268.1
Umbral de pulso bajo	1.89							
Umbral de pulso alto	93.9							
Grupo 5								
Tasa de subida	27.49	3.872	0.6255	0.4937	-23.62	-85.92	-0.1318	-21.07
Tasa de bajada	-9.705	-3.302	-0.4602	-0.488	6.403	-65.98	-0.02781	6.042
Número de reversas	96.75	129.6	0.2102	0.2309	32.89	34	0.02077	9.881

Tabla 39 Resultados RVA EH 10041 Sanalona I

t	Pre: 1924-1958		Post: 1959-1991		Límites de RVA		AH				
	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Medias	CV	Mínimo	Máximo	Bajo	Alto	(Cat. media)
Grupo 1											
Oct	23.5	0.9	4.6	82.6	38.3	0.5	5.2	72.5	10.8	44.8	0.0
Nov	13.4	1.3	3.8	62.5	25.1	0.5	0.2	53.0	5.4	30.5	0.0
Dic	23.9	1.2	2.9	84.2	17.9	0.6	0.2	38.4	3.6	51.9	0.4
Ene	12.3	1.4	2.5	65.6	15.6	0.8	0.1	48.8	3.9	29.5	-0.1
Feb	7.3	1.1	1.0	28.8	18.9	0.7	0.0	48.7	1.6	15.5	-0.4
Mar	3.4	0.8	0.8	8.9	23.3	0.7	0.2	49.3	1.3	6.2	-0.6
Abr	3.7	1.6	0.5	21.5	26.2	0.7	0.0	60.7	0.6	9.7	-0.7
May	3.1	2.0	0.3	22.1	28.3	0.6	0.1	52.1	0.4	9.3	-0.6
Jun	8.7	1.1	0.6	32.1	24.4	0.6	0.2	52.0	1.4	18.7	-0.6
Jul	43.6	1.2	0.9	193.6	18.5	1.0	0.2	68.1	6.4	95.3	-0.1
Ago	84.1	0.4	4.9	143.0	22.8	0.9	0.6	90.5	48.2	120.0	-0.9
Sep	90.0	0.5	31.7	198.5	41.8	0.9	0.7	177.3	40.9	139.1	-0.5
Grupo 2											
1-día mínimo	0.3	1.5	0.0	1.9	0.9	2.0	0.0	7.1	0.1	0.8	-0.6
3-días mínimo	0.3	1.5	0.0	1.9	1.3	2.0	0.0	9.2	0.1	0.8	-0.5
7-días mínimo	0.4	1.4	0.0	1.9	1.7	1.9	0.0	11.4	0.1	0.8	-0.5
30-días mínimo	0.6	1.3	0.0	2.6	3.4	1.4	0.0	15.0	0.3	1.4	-0.6
90-días mín.	1.9	1.4	0.5	10.2	7.9	0.9	0.1	26.2	0.6	4.7	-0.4
1-día máx.	732.4	0.5	194.3	1285.0	172.1	0.9	33.0	601.6	365.5	1,099.0	-0.8
3-días máximo	419.2	0.4	181.7	694.8	140.3	0.9	30.9	535.5	254.8	583.7	-0.7
7-días máximo	269.7	0.3	155.2	438.7	109.0	0.8	20.1	400.0	181.9	357.5	-0.8
30-días máximo	126.8	0.4	69.7	198.5	63.1	0.5	5.6	178.3	77.9	175.8	-0.6
90-días máximo	74.4	0.5	25.7	156.9	42.1	0.4	2.4	108.6	37.3	111.5	0.2
No. de días con caudal cero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Índice caudal base	0.0	1.2	0.0	0.1	0.1	2.0	0.0	0.6	0.0	0.0	-0.7
Grupo 3											
Fecha de caudal mín.	156.3	0.1	68.0	184.0	174.8	0.2	1.0	349.0	124.1	171.8	-0.9
Fecha de caudal máx.	263.0	0.2	23.0	360.0	251.0	0.2	14.0	314.0	173.8	352.2	0.1
Grupo 4											
Conteo pulsos bajos	3.0	1.1	1.0	12.0	6.7	0.8	0.0	17.0	1.0	6.3	-0.5
Duración pulsos bajo	59.4	0.8	5.0	135.0	31.3	2.3	2.0	333.0	13.5	105.3	-0.8
Conteo pulsos altos	8.1	0.4	3.0	13.0	1.0	1.2	0.0	5.0	4.8	11.4	-1.0
Duración pulsos alto	3.4	0.3	2.3	5.2	7.0	1.0	1.0	26.0	2.5	4.4	-0.8
El umbral de pulso bajo es			1.9								
El umbral de pulso alto es			93.9								
Grupo 5											
Tasa de subida	27.5	0.6	4.1	57.4	3.9	0.5	0.9	8.3	10.3	44.7	-1.0
Tasa de bajada	-9.7	-0.5	-18.3	-2.8	-3.3	-0.5	-8.1	-0.6	-14.2	-5.2	-0.8
Número de reversas	96.8	0.2	56.0	124.0	129.6	0.2	37.0	208.0	76.4	117.1	-0.6