

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

Estimación comparada del caudal ecológico en el río Chancay-Lambayeque con métodos de enfoque hidrológico y eco-hidráulico

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Claudia Fiorella Chávez Céspedes

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Sergio Brian Lara Camarena

ASESOR:

Federico Alexis Dueñas Dávila

Lima, mayo, 2020

RESUMEN

El caudal ecológico es un término que surgió como una solución a la posible pérdida del recurso hídrico debido a su explotación desmedida por la sociedad. En la actualidad, este concepto ha evolucionado hasta considerarse una herramienta para mitigar los impactos ecológicos que ocasionan la alteración de los regímenes naturales de los cuerpos de agua. Por ello, se pretende que todos los ríos posean la cantidad y calidad de agua necesaria para preservar a los sistemas acuáticos dependientes.

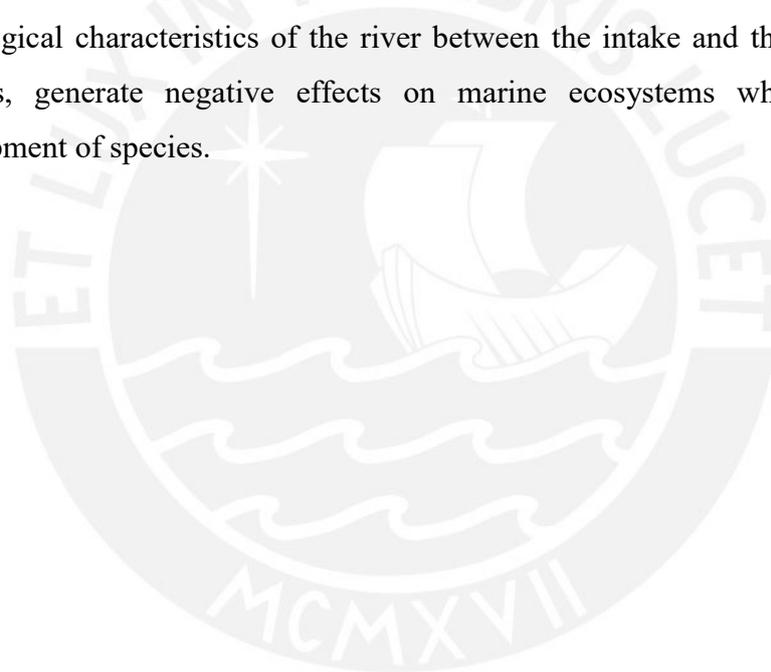
En el Perú, la cuenca del río Chancay – Lambayeque es considerada una de las más importantes debido a su alto caudal, que permite almacenar sus aguas en el reservorio Tinajones para luego derivarlas a diversos poblados, como son Chiclayo y Lambayeque, para uso poblacional y de regadío (Pact Perú, 2013). Estas actividades son una fuente económica de altos ingresos para el país; sin embargo, la variación de las características hidrológicas del río entre la bocatoma y la sección de restitución del caudal, generan efectos negativos en los ecosistemas marinos, los cuales amenazan el desarrollo de especies.

Palabras clave: caudal ecológico, trucha arco iris, métodos hidrológicos, método eco hidráulico.

ABSTRACT

The ecological flow is a term that emerged as a solution to the possible loss of water resources due to its excessive exploitation by society. Nowadays, this concept has evolved until it got considered as a tool to mitigate ecological impacts, caused by the alterations of water bodies' natural regimes.

In Perú, the basin of the river Chancay-Lambayeque is considered to be one of the most important of the country because of its high flow, which allows it to store its water in the Tinajones reservoir and then divert them to various towns, such as Chiclayo and Lambayeque, for population and irrigation use (Pact Perú, 2013). These activities are a high-income economic source; however, the variation of the hydrological characteristics of the river between the intake and the flow restitution sections, generate negative effects on marine ecosystems which threaten the development of species.



Keyword: ecological flow, rainbow trout, hydrological methods, Eco hydraulics method

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, abuelos y hermanos, por su apoyo y amor incondicional durante la realización de esta investigación.

A nuestro asesor, PhD. Federico Alexis Dueñas Dávila, por su inmensa paciencia y numerosos comentarios de apoyo brindados durante el desarrollo de esta investigación que hizo posible solucionar todos los inconvenientes que se presentaron en el camino.

A la Junta de usuarios de Chiclayo, por proporcionar la información necesaria para el desarrollo de esta tesis.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. OBJETIVOS	11
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	11
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.2. JUSTIFICACIÓN	11
1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.3.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA	12
1.3.2. DELIMITACIÓN TEÓRICA	13
1.4. LIMITACIONES	13
2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1. ANTECEDENTES	14
2.1.1. NORMATIVA DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN OTROS PAISES DE LA REGIÓN	14
2.1.2. EVOLUCIÓN DE LA LEGISLACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN PERÚ	15
2.2. MARCO CONCEPTUAL	19
2.2.1. AGUA	19
2.2.2. CICLO HIDROLÓGICO	20
2.2.3. CUENCA HIDROGRÁFICA	22
2.2.4. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS EN CANALES ABIERTOS	23
2.2.5. RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES	23
2.3. REVISIÓN DE LA LITERATURA	24
2.3.1. CAUDAL ECOLÓGICO	25
2.3.2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO	26
3. METODOLOGÍA	35
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	35
3.2. ENFOQUE HIDROLÓGICO	36
3.2.1. DATOS RECOLECTADOS	36
3.2.2. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN	37
3.3. ENFOQUE ECO-HIDRAULICO	37
3.3.1. DATOS RECOLECTADOS	37
4. CÁLCULOS Y RESULTADOS	48
4.1. ENFOQUE HIDROLÓGICO	48
4.1.1. NEW ENGLAND AQUATIC BASE FLOW	48
4.1.2. CAUDAL MEDIO MENSUAL	49
4.1.3. CAUDAL CON 90% DE EXCEDENCIA	50

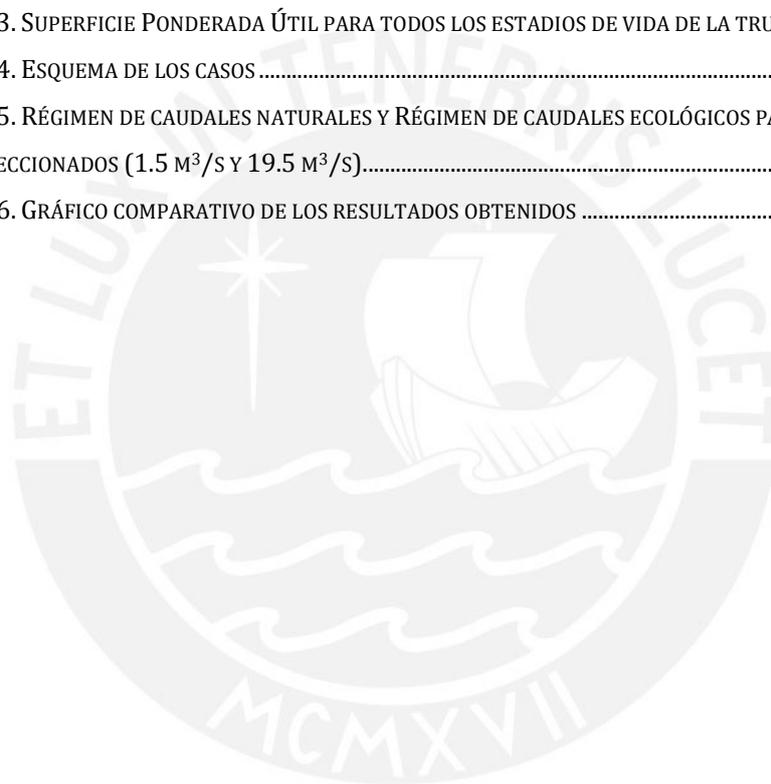
4.1.4. MÉTODO DE RAFAEL HERAS	51
4.1.5. MÉTODO DE TENNAN.....	52
4.2 ENFOQUE ECO HIDRÁULICO.....	53
4.2.1. PREPARACIÓN DEL MODELO	53
4.2.2. EJECUCIÓN DEL MODELO.....	58
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS HIDROLÓGICOS.....	65
5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ECOHIDRAULICOS.....	67
5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS	72
6. CONCLUSIONES	75
7. REFERENCIAS.....	78
ANEXOS	82



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE.....	12
FIGURA 2. EVOLUCIÓN DE LA LEGISLACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL PERÚ.....	18
FIGURA 3. ESQUEMA DE APROBACIÓN DE PROYECTOS	19
FIGURA 4. ESQUEMA DEL CICLO HIDROLÓGICO	20
FIGURA 5. ESQUEMA DE PUNTOS IMPORTANTES DE LA CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE	22
FIGURA 6. GRÁFICA DE PERÍMETRO MOJADO VS CAUDAL Y SECCIÓN TRANSVERSAL	30
FIGURA 7. FLUJO DE TRABAJO IFIM.....	32
FIGURA 8. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO IFIM.....	33
FIGURA 9. BOCATOMA RACA RUMI	36
FIGURA 10. SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN RACA RUMI.....	37
FIGURA 11. ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE TOMA DE DATOS.	41
FIGURA 12. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS.....	42
FIGURA 13. PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA SECCIÓN	43
FIGURA 14. SECCIÓN DEL RIO ANALIZADO	43
FIGURA 15. SECCIÓN DEL TRAMO EN AÑOS ANTERIORES	44
FIGURA 16. ZONA DE ANÁLISIS EN EL RIO CHANCAY Y COMPOSICIÓN DEL FONDO DEL CAUCE	44
FIGURA 17. FONDO DE LA ZONA IZQUIERDA DEL RIO.....	47
FIGURA 18. HIDROGRAMA DEL MÉTODO NEABF	49
FIGURA 19. HIDROGRAMA DEL CAUDAL MEDIO MENSUAL	50
FIGURA 20. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES.....	51
FIGURA 21. HIDROGRAMA CAUDAL ECOLÓGICO – MÉTODO DE 90% DE PERSISTENCIA	51
FIGURA 22. ESQUEMA DE DATOS CON LOS CAUDALES MÁS BAJOS.....	52
FIGURA 23. HISTOGRAMA CAUDAL ECOLÓGICO – RAFAEL HERAS.....	52
FIGURA 24. CAUDALES CALCULADOS CON USO DEL MÉTODO DE TENNAN	52
FIGURA 25. PROGRAMACIÓN INICIAL DEL PROGRAMA PHABSIM.....	53
FIGURA 26. VENTANA EDIT CROSS SECTION DATA	54
FIGURA 27. VENTANA CALIBRATION DATA	55
FIGURA 28. EDIT CROSS SECTION DATA.....	56
FIGURA 29. PESTAÑA SIMULATION DISCHARGES DEL PROGRAMA PHABSIM.....	57
FIGURA 30. PESTAÑA HABITAT SUITABILITY CRITERIA CURVES DEL PROGRAMA PHABSIM.....	57
FIGURA 31. ASIGNACIÓN Y CORRIDA DEL MODELO STGQ	59
FIGURA 32. VENTANA DE VELOCITY SIMULACIÓN	60
FIGURA 33. ESQUEMA DE VELOCIDADES SIMULADAS EN LA SECCIÓN 1.00 PARA Q=8,64M ³ /s.....	60
FIGURA 34. VENTANA HABTAE CON MENSAJE DE SIMULACIÓN COMPLETA.....	61

FIGURA 35. PREFERENCIAS DE LA ESPECIE SENSIBLE SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL RÍO (ÁREA, PROFUNDIDAD, VELOCIDAD E ÍNDICE DE CANAL)	62
FIGURA 36. IMAGEN DE LA WUA PARA LA TRUCHA EN ESTADO FRESA	63
FIGURA 37. GRÁFICO DEL WUA PARA LA TRUCHA EN ESTADO ALEVÍN	63
FIGURA 38. GRÁFICO DEL WUA PARA LA TRUCHA EN ESTADO JUVENIL	63
FIGURA 39. GRÁFICO DEL WUA PARA LA TRUCHA EN ESTADO ADULTO	64
FIGURA 40. NIVEL DE AGUA (WSL) OBSERVADO Y SIMULADO PARA CAUDALES DE INTERÉS EN LA SECCIÓN MÁS AGUAS ABAJO.	68
FIGURA 41. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE LOS CAUDALES SIMULADOS EN LA SECCIÓN 2 DEL RIO	69
FIGURA 42. ESQUEMA DEL PROCESO PARA OBTENER LAS GRÁFICAS WUA	69
FIGURA 43. SUPERFICIE PONDERADA ÚTIL PARA TODOS LOS ESTADIOS DE VIDA DE LA TRUCHA	70
FIGURA 44. ESQUEMA DE LOS CASOS	71
FIGURA 45. RÉGIMEN DE CAUDALES NATURALES Y RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS PARA LOS DOS PICOS SELECCIONADOS (1.5 m ³ /s Y 19.5 m ³ /s)	72
FIGURA 46. GRÁFICO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	73

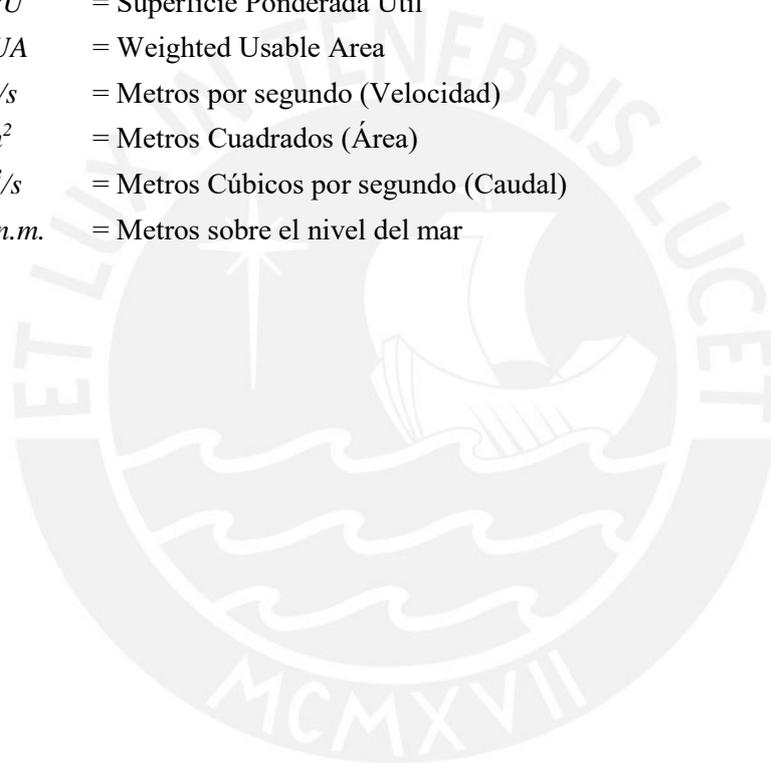


LISTA DE TABLAS

TABLA 1.....	17
TABLA 2.....	27
TABLA 3.....	27
TABLA 4.....	31
TABLA 5.....	34
TABLA 6.....	35
TABLA 7.....	38
TABLA 8.....	39
TABLA 9.....	40
TABLA 10.....	40
TABLA 11.....	45
TABLA 12.....	46
TABLA 13.....	46
TABLA 14.....	49
TABLA 15.....	54
TABLA 16.....	55
TABLA 17.....	56
TABLA 18.....	65
TABLA 19.....	66
TABLA 20.....	66
TABLA 21.....	70
TABLA 22.....	71
TABLA 23.....	73
TABLA 24.....	74
TABLA 25.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>ANA</i>	= Autoridad Nacional del Agua
<i>AAA</i>	= Autoridad Administrativa del Agua
<i>CDC</i>	= Curva de Duración de Caudales
<i>CE</i>	= Caudal Ecológico
<i>IFIM</i>	= Instream Flow Incremental Methodology
<i>NEABF</i>	= New England Aquatic Base Flow
<i>SPU</i>	= Superficie Ponderada Útil
<i>WUA</i>	= Weighted Usable Area
<i>m/s</i>	= Metros por segundo (Velocidad)
<i>m²</i>	= Metros Cuadrados (Área)
<i>m³/s</i>	= Metros Cúbicos por segundo (Caudal)
<i>m.s.n.m.</i>	= Metros sobre el nivel del mar



1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Estimar de forma comparada caudales ecológicos para el tramo de análisis del río Chancay mediante metodologías de enfoque hidrológico y de simulación de hábitat a través del software PHABSIM.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar caudales ecológicos para el tramo de análisis del río Chancay mediante el enfoque hidrológico e identificar las variables que intervienen en el cálculo.
- Determinar caudales ecológicos para el tramo del río Chancay mediante el enfoque eco-hidráulico con uso del software PHABSIM.
- Comparar los resultados obtenidos por ambos enfoques

1.2. JUSTIFICACIÓN

El incremento del aprovechamiento del recurso hídrico en la gran mayoría de países, incluido el Perú, ha ocasionado que los investigadores enfoquen su atención en los daños que esta situación podría generar en los ecosistemas debido a la alteración de las características hidrológicas de los ríos (Autoridad Nacional del Agua, 2015). Por ello, se considera necesario determinar una cantidad de caudal que proporcione a los ecosistemas acuáticos, y todos aquellos que requieran de este, un funcionamiento adecuado (Aguilera & Pouilly, 2012). En otras palabras, un volumen de agua que permita a todas las especies dependientes de este no ser afectados a corto o largo plazo.

Para la estimación del caudal ecológico, existen más de 200 metodologías (Diez-hernández, 2008), lo cual representa una serie de caminos que se pueden utilizar para obtener un valor de flujo; sin embargo, también, genera una variación entre los posibles resultados que distintos especialistas podrían obtener para un mismo tramo de un río. Por ello, se considera que la inclusión de un determinado método para el cálculo del caudal ecológico o de valores mínimos en el marco normativo de los países, representaría una mejora en la dispersión de los resultados.

Asimismo, significaría la realización de un estudio hidrológico más avanzado como una exigencia y una obligación para las empresas que se dedican a la construcción de obras hidráulicas. El presente trabajo busca comparar dos enfoques existentes para la determinación del caudal ecológico.

1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación está condicionada por los siguientes alcances geográficos y teóricos. Asimismo, dichas delimitaciones también se encuentran restringidas a la información recopilada de la zona de estudio. En esta sección, se detalla la delimitación geográfica, en la cual se muestran las principales características del lugar de análisis. Por otro lado, también se presentará una delimitación teórica, donde se indicarán los métodos agrupados por distintos enfoques que serán utilizados para el desarrollo de esta investigación.

1.3.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

Esta investigación se desarrolla en una serie de secciones ubicadas en un tramo longitudinal del río Chancay, el cual es uno de los principales afluentes de la cuenca Chancay-Lambayeque. La sección de análisis se encuentra ubicada inmediatamente después de la bocatoma Raca Rumi entre los departamentos de Cajamarca y Lambayeque. El río es de régimen irregular y cuenta con una longitud de 204 km aproximadamente. Asimismo, el origen de este afluente se encuentra en la cordillera occidental de los andes y pertenece a la vertiente del Pacífico.

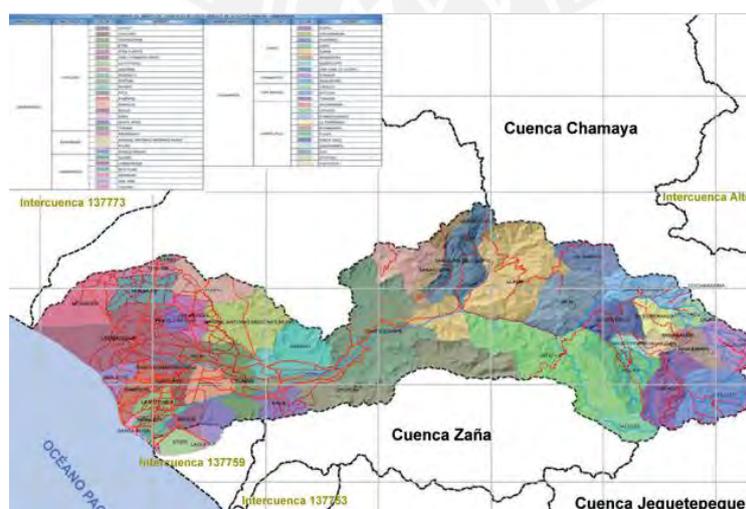


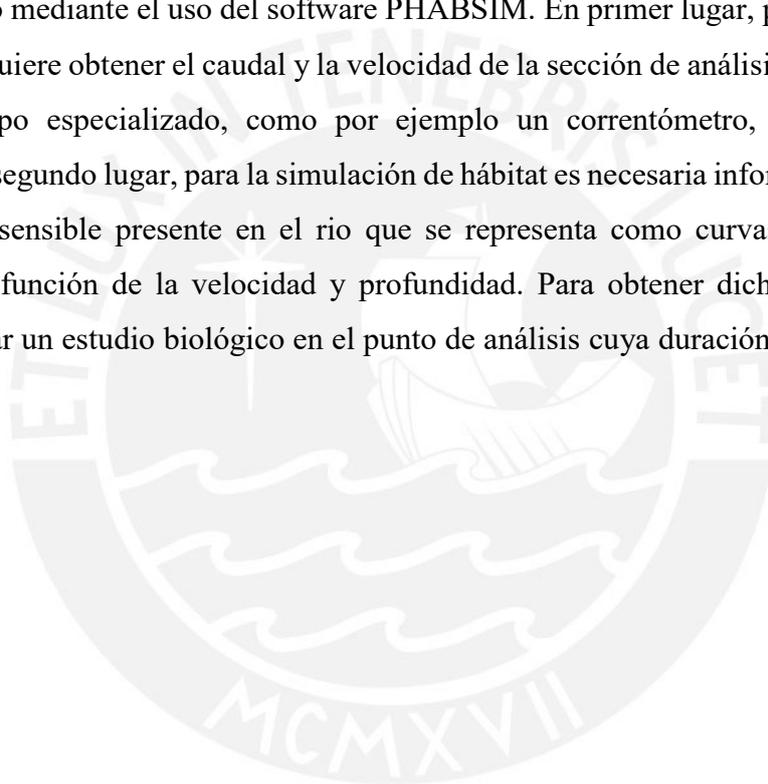
Figura 1. Cuenca Chancay-Lambayeque.
Fuente: Autoridad nacional del Agua (2013)

1.3.2. DELIMITACIÓN TEÓRICA

En el presente trabajo, se estimará el caudal ecológico a través de varios métodos agrupados en dos enfoques, hidrológico y eco hidráulico. Los métodos a utilizar del primer enfoque son: New England Aquatic base Flow, Método del caudal medio mensual, Rafael Heras, 90% de excedencia y Tennan. Para el enfoque eco hidráulico, se empleará la metodología IFIM con uso del software PHABSIM.

1.4 LIMITACIONES

El trabajo de investigación realizado presenta las siguientes limitaciones para la estimación del caudal ecológico mediante el uso del software PHABSIM. En primer lugar, para la simulación hidráulica se requiere obtener el caudal y la velocidad de la sección de análisis, es deseable que se emplee equipo especializado, como por ejemplo un correntómetro, para realizar las mediciones. En segundo lugar, para la simulación de hábitat es necesaria información biológica de una especie sensible presente en el río que se representa como curvas que indican las preferencias en función de la velocidad y profundidad. Para obtener dicha información es necesario realizar un estudio biológico en el punto de análisis cuya duración es de 12 meses y es costoso.



2. ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo exhibe las siguientes tres secciones: antecedentes, marco teórico y revisión de la literatura. La primera contiene una compilación de los procedimientos adoptados en la gestión de los recursos hídricos en países sudamericanos y la evolución de la reglamentación peruana relacionada a la determinación del caudal ecológico. La segunda introduce un conjunto de concepciones básicas, las cuales se dividieron en tres sistemas: ciclo hidrológico, cuencas hidrográficas y estructuras hidráulicas. Por último, la tercera sección es una recopilación de la investigación realizada sobre la evolución de la definición del caudal ecológico y los métodos más conocidos que se elaboraron para su cálculo.

2.1 ANTECEDENTES

En el presente subcapítulo, se detallará las normativas del caudal ecológico que se aplican en otros países de la región para poder compararlo con las existentes en el Perú. Adicionalmente, se describirá la evolución de la legislación de los recursos hídricos en el país y la situación actual respecto a su explotación.

2.1.1. NORMATIVA DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN OTROS PAISES DE LA REGIÓN

Normativa en Chile

En el año 1981, se creó el Código de aguas, el cual fue primer documento destinado a la gestión de los recursos hídricos en el país. Dicho código define al agua como un bien nacional de uso público y no establece una regulación del caudal mínimo en los ríos. Luego, en el año 2005, se aprueba la ley 20017, la cual modificó y adicionó algunos artículos del Código de aguas. Posteriormente, se incorporó el artículo N°129 que indica lo siguiente: “Al construir los derechos de aprovechamiento de agua, la Dirección General de Aguas velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal mínimo” (Ley N°20017, 2005). De esta manera, se establece la necesidad de determinar un caudal mínimo y garantizar su permanencia si es que se desea aprovechar este recurso. En el año 2012, se publicó el decreto supremo N°14, en el cual se aprueba una

reglamentación para estimar el caudal ecológico que deberá permanecer en el río. Dicho cálculo se realizará en función del caudal que presente un 95% de persistencia y el medio mensual. Finalmente, en el año 2015, se aprueba una nueva modificación; sin embargo, no se presentan cambios en la normativa para este cálculo.

Normativa en Ecuador

La normativa sobre los recursos hídricos en este país señala que el agua es de uso público y cualquier tipo de privatización está prohibida. Asimismo, indica que la institución encargada de la planificación y gestión de los recursos hídricos será la Autoridad Única del Agua, la cual garantizará la distribución de este recurso para el consumo humano, el caudal ecológico y, por último, las actividades productivas. Todo lo mencionado se detalla en el artículo N°318 de su constitución política del año 2008. Posteriormente, se aprueba la “Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua” en el año 2014, en la cual se encuentran los artículos 76 y 77 en el capítulo de Garantías Preventivas. En el primero, se indica que la Autoridad Única del Agua en Conjunto con la Autoridad Nacional Ambiental se encargará de determinar las metodologías a utilizar para el cálculo del caudal ecológico. En el segundo, se manifiesta que los caudales ecológicos presentes en todas las cuencas hidrográficas son de carácter intangible y que aquella institución que atente contra esta disposición será responsable de los daños ambientales, así como de realizar indemnizaciones de ser necesario. Por último, es necesario mencionar que, si bien es importante que se haya incluido en su constitución política la gestión de los recursos hídricos, no se ha definido de manera clara cuál es el proceso a seguir para determinar el caudal ecológico. Por el contrario, deriva dicha responsabilidad a la Autoridad Única del agua, lo cual implica no contar con un marco legal definido sobre las diversas metodologías existentes y su posibilidad de aplicación.

2.1.2. EVOLUCIÓN DE LA LEGISLACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN PERÚ

Desde los inicios del gobierno republicano, se realizó la promulgación de políticas con el objetivo de resolver la serie de problemas generados a causa de la ineficiente gestión de la distribución del recurso hídrico en el Perú. No obstante, la solución planteada fue la distinción de una o varias personas encargadas por departamento para designar las normas correspondientes. Posteriormente, se evidenció la desorganización producto de la falta de una figura pública estable con las facultades necesarias para solucionar todos los conflictos respectivos al manejo del agua. Por ello, en 1902, se publica el Código de Aguas (1902-1969),

el cual comunica que cualquier fuente de este recurso que se ubique en los límites de un predio, le pertenecía al dueño del mismo. Ante este anuncio, aquellos que no poseían un terreno con fuentes de agua que satisfagan sus exigencias, como los agricultores y campesinos, protestaron sin un resultado favorable hasta la reforma agraria, que se presenció muchos años después.

Al poco tiempo de la promulgación de la Ley de Reforma Agraria (1969), se anunció el decreto N°17752, el cual aprobaba la Ley General de Aguas (LGA). En ella, se indicaba que el agua era patrimonio del Estado y que se debía tener en cuenta al conjunto de actividades que dependían de este recurso para elaborar una lista de prioridades y efectuar un manejo estable. A pesar de este avance, Guevara menciona que los consumidores no contaban con un periodo de tiempo definido para adecuarse ni con una institución encargada de sancionar a aquellos que no efectuaran lo expuesto en el decreto (2013). Además, en el artículo N°12 de la presente ley se expresa que es obligación de los usuarios de los Distritos de Riego efectuar una cancelación en base a un precio fijo por unidad de volumen y la cantidad de agua utilizada (Autoridad Nacional del Agua., 2015). De este modo, se invirtió la diferencia alcanzada entre el capital recolectado y los gastos de explotación para invertir en la investigación y construcción de obras hidráulicas básicas para las localidades.

En el 2009, meses después de la fundación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), se promulgó la Ley de Recursos Hídricos (LRH), cuyos artículos mantienen al agua como propiedad del estado y niega la posibilidad de privatizarla. Esta normativa posee como fundamento once principios, entre los cuales se pueden enfatizar los siguientes: el enfoque sostenible, el respeto del uso de recurso hídrico por las poblaciones campesinas, la gestión integrada participativa por cuenca hidrográfica, etc. Además, en la presente ley, se define formalmente el caudal ecológico en el país y la inclusión de este en los planteamientos para el manejo del agua en las cuencas se convierte en una obligación.

De esta manera, se reconoce que se puede determinar un caudal ecológico a todo cauce de agua corriente, cuyas consideraciones dependerán de los requerimientos y la escala del afluente. Un año después, se realizó una publicación complementaria a la ley de Recursos Hídricos, el Reglamento de Recurso hídricos (N°29338), el cual anunciaba en su artículo 59° Otorgamiento y modificación de la licencia de uso, que se deberá calcular el valor del caudal ecológico de los ríos afectados por la construcción y funcionamiento de futuras obras hidráulicas, así como

controlar que se cumpla con dicho volumen (Ley N°29338, 2009). Asimismo, en el artículo 155°, el ANA indica lo siguiente.

“Las metodologías para la determinación del caudal ecológico serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función a las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos específicos a ser alcanzados” (2010, p. 45)

En síntesis, se presenciaron tres períodos importantes en la evolución legislativa del recurso hídrico en el Perú, definidos por el enfoque de las autoridades y las normativas que se publicaron: Código de Aguas, Ley General de Aguas y Ley de Recursos Hídricos. Asimismo, en el 2009, el estado peruano define el término caudal ecológico y enfatiza la importancia de que este sea respetado en todas las construcciones que afecten a las fuentes de agua. A continuación, se expone la siguiente tabla resumen de los periodos en mención, así como sus características más importantes.

Tabla 1.

Cuadro Comparativo entre la Ley General del Agua y la Ley de Recursos Hídricos

	Ley General del Agua (Decreto Ley N° 17752)	Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29938)
Visión de la Gestión	Sectorial (agrarista) Distrito de Riego	Multisectorial Cuenca
Propiedad del agua	Agua pertenece al Estado	Agua pertenece al Estado. No hay propiedad privada
Roles del Ejecutivo	Intervención de muchas entidades sin coordinación	Autoridad Única ANA Sistema Nacional de Recursos Hídricos
Capacidad de la Autoridad	No puede hacer cumplir sus decisiones	Facultad sancionadora y coactiva
Instrumentos de planificación	No hay normas PCR para todos los usos	Política y Estrategia Nacional
Información	Dispersa Desarticulada	Sistema Nacional de Información de Recursos hídricos
Participación de usuarios en la gestión	No regula su participación	Participa en planificación y seguimiento

Extraído de: Chávez, Lara (2019)

Después, en mayo del 2015, se prepublica en la Resolución Jefatural N° 117-2015-ANA el proyecto de “Lineamientos para la Elaboración de Estudios sobre Caudales Ecológicos” con el fin de recoger aportes y sugerencias de especialistas en el tema. Así, en junio del 2016, se publica la Resolución Jefatural N°154-2016-ANA, con posterior corrección en forma en la RJ N°206-2016-ANA, donde la Autoridad Nacional del Agua (ANA) donde se resuelve la aprobación de la metodología para la determinación de caudales ecológicos (CE). Este documento indica que la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) es quien determinará los CE para la acreditación de la disponibilidad hídrica para proyectos de inversión. Además, al aprobarse esta, la AAA otorga la “Opinión Técnica Favorable a la Disponibilidad Hídrica” o la “Opinión Técnica Favorable a la Disponibilidad Hídrica”, la cual se incluye en el instrumento de gestión ambiental.

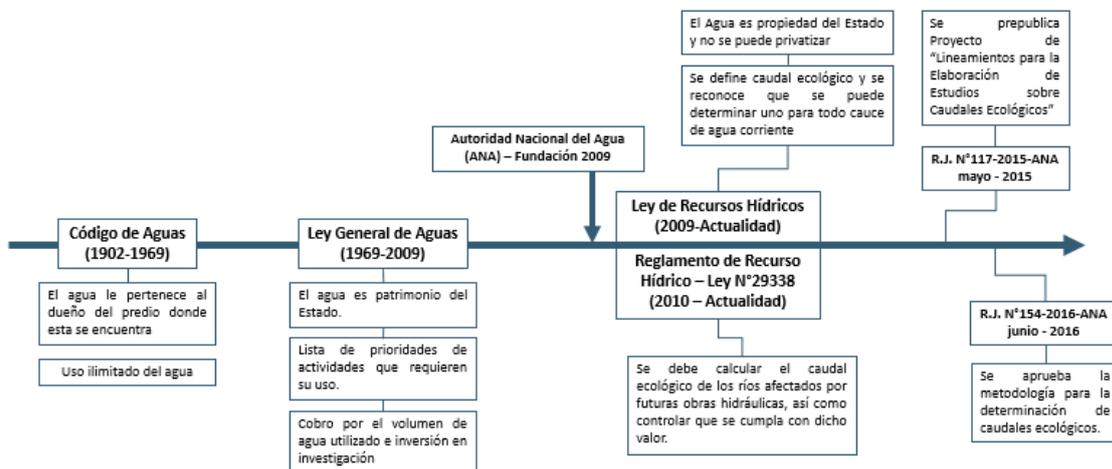


Figura 2. Evolución de la Legislación de los Recursos Hídricos en el Perú

Para determinar el CE, se puede realizar optativamente un estudio de caudal ecológico referencial o un estudio específico de caudal ecológico. El primero se estima como el flujo con 95% de persistencia en el tramo de análisis para un registro histórico de caudales de, al menos, veinte años. No obstante, los titulares de proyectos de inversión podrán inclinarse por la segunda opción, cuya metodología dependerá del instrumento de gestión ambiental que deben entregar. Lo explicado anteriormente se presenta resumido en el siguiente gráfico.

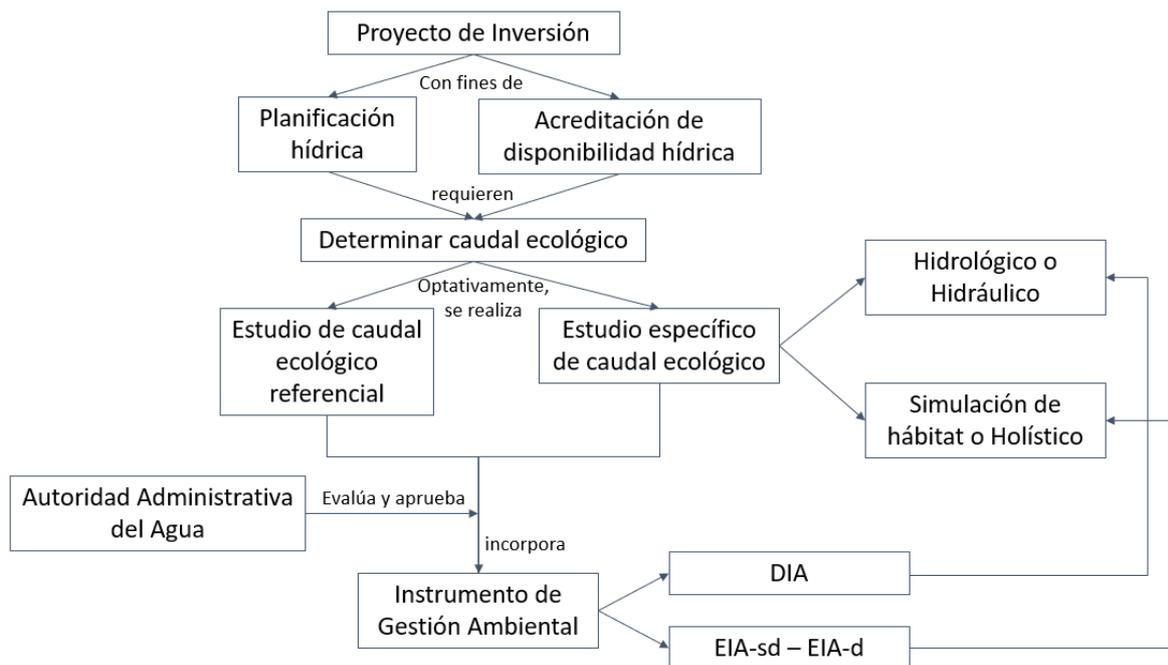


Figura 3. Esquema de aprobación de Proyectos

Cabe resaltar que, en el artículo 8 de la RJ N°154-2016-ANA, se describen tres casos que invalidan la aplicabilidad del estudio de caudal ecológico referencial, los cuales están relacionados a la amenaza de especies hidrobiológicas involucradas en el desarrollo de actividades o consideradas endémicas. Asimismo, proyectos que ocasionen impactos irreversibles en el régimen natural de caudales de un cuerpo de agua están en la obligación de elaborar un estudio específico de caudal ecológico.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual de la presente investigación pretende introducir los conceptos que serán necesarios para obtener una mejor comprensión de los siguientes capítulos. Los conceptos a definir se agruparán de la siguiente manera: Ciclo hidrográfico, Cuencas hidrológicas y Obras hidráulicas. Adicionalmente se presentará la definición del agua descrita en la Ley de Recursos Hídricos.

2.2.1. AGUA

La Ley de Recursos Hídricos define a el agua como: “Un recurso natural renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento sostenible y ciclos naturales que la sustentan, y la seguridad de la Nación” (2009). En este enunciado se evidencia su importancia para la preservación de la vida y la necesidad de mantenerla.

2.2.2. CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es una secuencia de recorridos que el agua atraviesa en sus tres estados de manera continua y cíclica mediante los diversos almacenamientos que se presentan en la tierra como: la atmosfera, los océanos, el agua subterránea, entre otros. (Ordoñez, 2011). El traslado entre un almacenamiento y otro se realiza mediante los procesos de precipitación, evaporación, condensación, sublimación, escorrentía, infiltración y evapotranspiración.

El ciclo hidrológico se analiza como un sistema, debido a que la cuantificación de los movimientos del agua es una tarea compleja. Este sistema se subdivide en tres subsistemas: agua atmosférica, agua superficial y agua sub superficial. En el primero, se incorporan el agua de las precipitaciones, la evaporación, intercepción y transpiración, como se puede observar en la Figura 4. El segundo subsistema presenta los procesos que realiza la escorrentía. Por último, el tercer subsistema comprende la infiltración, los flujos sub superficiales y subterráneos.

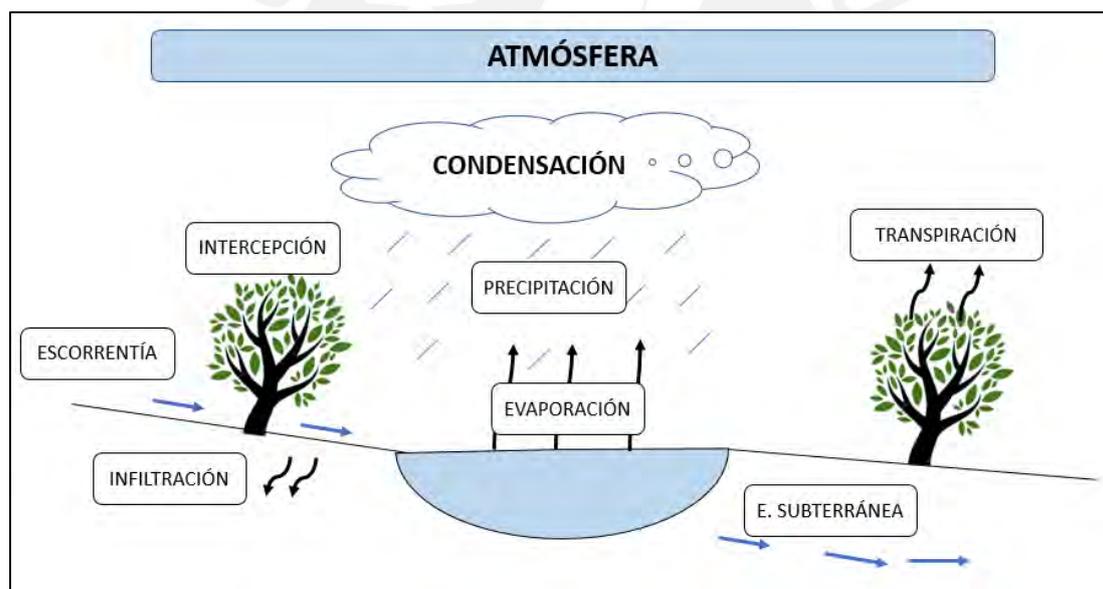


Figura 4. Esquema del ciclo hidrológico
Fuente: Chávez, Lara (2019)

Evaporación

El agua que transita en cuerpos de agua, como océanos, lagos, ríos, etc., se evaporan y transportan a la atmosfera. Este proceso ocurre principalmente por la radiación solar, la cual provee la energía necesaria que permite iniciar el proceso de cambio de estado de líquido a gaseoso. Adicionalmente, la velocidad del viento y la gradiente de humedad específica sobre la superficie influyen en el proceso de evaporación (Chow, 1994).

Condensación

La condensación es un proceso ocasionado por un descenso de temperatura atmosférica. El agua presente en esta capa se enfría y empieza a formar nubes. Cuando estas se saturan, inicia la precipitación.

Precipitación

El agua que se condensa y desciende a la superficie terrestre debido a una disminución en la temperatura es llamada agua de precipitación. Esta se puede presentar como lluvia, granizo, nieve, entre otros. En un sistema hidrológico, esta representa la única entrada. (Ordoñez-Gálvez, 2011).

Transpiración

El agua que es absorbida por las raíces de las plantas y, posteriormente, es liberada por sus hojas se denomina agua de transpiración. Este proceso depende, al igual que la evaporación, de la velocidad del viento y la gradiente de humedad específica. Asimismo, el suministro de humedad es otro factor que se debe tomar en cuenta, ya que afecta la tasa de transpiración (Chow, 1994)

Intercepción

El agua de intercepción es aquella que no realizó un contacto con el suelo, ya que es retenida por vegetación o por estructuras existentes. Asimismo, la cantidad de agua retenida depende de diversos factores como: la velocidad del viento, la intensidad de la precipitación, y la etapa de crecimiento en conjunto con la densidad de la vegetación. (Pierre, 2002). La cantidad de agua interceptada dependerá directamente de la superficie que se encuentre cubierta, ya sea por vegetación o estructuras.

Infiltración

El agua de infiltración es aquella que se trasladó por los vacíos del suelo, lo que incrementa el porcentaje de saturación del mismo.

Escorrentía

La escorrentía se puede dividir en tres procesos. La primera es la escorrentía superficial, la cual es el agua de las lluvias que fluye sobre la superficie del suelo hasta unirse con el océano. La segunda se llama escorrentía sub superficial y ocurre cuando el agua de precipitación se infiltra

en el suelo hasta una profundidad aleatoria, en la cual no entra en contacto con algún almacenamiento subterráneo y continua su recorrido hacia el océano. Por último, la escorrentía subterránea es aquella parte del agua infiltrada en el suelo que alcanzó una profundidad donde los estratos se encuentran saturados y continua su recorrido hacia el océano. (Ordoñez-Gálvez, 2011).

2.2.3. CUENCA HIDROGRÁFICA

Se le denomina cuenta hidrográfica a aquel espacio topográfico definido, en el cual se capta agua de precipitación en toda su superficie y se traslada a un único punto llamado punto de aforo. Asimismo, una cuenca puede tener subdivisiones llamadas subcuencas que en conjunto alimentan a la cuenca que las engloba. Del mismo modo, existen las microcuencas que descargan sus afluentes en las subcuencas.



Figura 5. Esquema de puntos importantes de la cuenca Chancay-Lambayeque
Elaborado a partir de Google Earth

Divisoria de agua

Las divisorias de agua son líneas que limitan las cuencas hidrográficas adyacentes y permiten identificar el agua de precipitación que corresponderá a cada cuenca. Asimismo, estas fronteras se obtienen mediante la unión de los puntos más altos, que son picos de montaña (M. Villon, 2002).

Cauce principal

En una cuenca hidrográfica, el cauce principal es aquel que presenta una mayor cantidad de caudal o longitud respecto a los demás afluentes. En su mayoría, el afluente principal va desde el punto de aforo de la cuenca hasta una línea divisoria; sin embargo, la elección de este es arbitral. (Ordoñez-Gálvez, 2011).

Punto de Aforo

En una cuenca hidrográfica, este es el único punto que pertenece a la línea divisoria, en el cual desemboca un río.

2.2.4. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS EN CANALES ABIERTOS

Estas estructuras son obras realizadas para manipular el comportamiento de un flujo de agua con el fin de contenerlo o redireccionarlo mediante la acción de la gravedad para generar un bienestar social. Como complemento a estas, se elaboran las denominados obras de arte para asegurar que el adecuado funcionamiento sea factible. A continuación, se definen las principales estructuras hidráulica, las cuales son las de conducción y regulación,

Estructuras de conducción

Estas estructuras posibilitan la conducción del flujo de agua. Por ejemplo, las caídas posibilitan el traslado del recurso hídrico de un punto de mayor nivel a uno de menor.

Estructuras de regulación

Las estructuras de regulación son aquellas que limitan el valor de nivel de superficie o caudal mediante el almacenamiento de un determinado volumen, el cual es utilizado posteriormente para las actividades productivas de las poblaciones como son el regadío, la producción de energía y el consumo humano.

2.2.5. RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES

El régimen de un caudal se define como las variaciones del flujo a lo largo del tiempo en un punto específico de la red hidrográfica y es de vital importancia para mantener la integridad ecológica de los sistemas hídricos (Poff, et al., 1997). Los cinco componentes críticos que influyen de manera directa o indirecta a los ecosistemas fluviales se detallan a continuación.

Magnitud

Cantidad de agua disponible por unidad de tiempo que transita por un determinado espacio.

Frecuencia

Este término hace referencia al número de veces que un caudal, cuyo valor es mayor a una magnitud fijada, se repite. Asimismo, afecta a la diversidad y ecología del río.

Duración

Intervalo de tiempo que corresponde a unas condiciones de flujo. En periodos de avenida y estiaje, este componente está relacionado los umbrales de resiliencia (García, 2013); es decir, la capacidad de las especies de recuperarse ante estos eventos.

Estacionalidad

La estacionalidad o temporalidad es la regularidad con la que un evento ocurre en una etapa específica del año. Este componente está relacionado con los ciclos de vida de las especies acuáticas. (ANA, 2015)

Tasas de cambio

Este término hace referencia a la rapidez con la que se producen variaciones en la magnitud de los caudales, lo que altera la habilidad de respuesta de las especies presentes en el ecosistema fluvial.

Cabe resaltar que, las obras hidráulicas descritas anteriormente generan alteraciones en los componentes del régimen mencionados, por lo que es importante determinar un caudal que permita la viabilidad de seres vivos dependientes del flujo afectado.

2.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En esta sección, se presenta la información recolectada sobre el origen y evolución del término caudal ecológico, así como una breve explicación de los métodos más utilizados pertenecientes a los cuatro enfoques creados para su determinación: hidrológico, hidráulico, eco-hidráulico y holístico.

2.3.1. CAUDAL ECOLÓGICO

El manejo ineficaz del recurso hídrico se presentó como un tema de prioridad e interés cuando los investigadores expresaron su preocupación ante la posibilidad de un futuro con escasez de agua, la cual perturbaría de manera indirecta y directa a varios sectores de la industria, como lo es la pesquería (Dyson, Bergkamp, & Scanlon, 2003). En el oriente de Estados Unidos, a finales de los años cuarenta, iniciaron las investigaciones para el desarrollo de metodologías para determinar el caudal ecológico. Sin embargo, no es hasta la década de los setenta que se evidenció un progreso acelerado a causa de los requerimientos impuestos para el manejo de agua por las nuevas normativas ambientales. Desde la década de los ochenta, otros países, como Brasil, Australia, Inglaterra, Japón, etc., presentaron avances importantes con la implementación de metodologías. En los años noventa, se incluyó el efecto de la variación del caudal en el ámbito social y económico, así como al ser humano como consumidor del agua (Flachier, 2016).

La definición de caudal ecológico se ha modificado a través del tiempo según el punto de vista que se poseía, iniciando como la cantidad de flujo determinada para conservar los valores bióticos del río hasta el valor de caudal requerido para preservar, de modo sostenible, los ecosistemas dependientes del río sin afectar las acciones de desarrollo de las localidades. Las transformaciones de este concepto originaron el término caudal ambiental, cuya perspectiva holística adiciona como componentes de análisis a la sociedad y la economía para la estimación de este valor (Flachier, 2016). Actualmente, varios investigadores han planteado sus propias definiciones del caudal ecológico según el objetivo ambiental que poseen; entre ellos, se encuentran los siguientes.

- King y Louw definen el caudal de mantenimiento como “Régimen de caudal que mantiene todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo el reclutamiento continuo y balanceado de las especies acuáticas y ribereñas. El caudal calculado para y dirigido hacia la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial” (1998).
- “Régimen de agua proporcionado dentro de un río, humedal o zona costera para mantener los ecosistemas y sus beneficios cuando existe una competencia en el uso del agua y donde los flujos están regulados” (M. Dyson et al., 2003, p. 3).
- La Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos en el artículo 153° define al caudal ecológico como “volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua

para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural” (2010, p. 45)

- Flachier describe el caudal ecológico como “Cantidad del régimen hidrológico original de un río que debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia las planicies de inundación para mantener valores característicos específicos del ecosistema” (2016, p. 21).

2.3.2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

El desarrollo de métodos para la determinación del caudal ecológico empezó en la década de los 70's. Los primeros se agruparon, en lo que actualmente se conoce como el enfoque hidrológico. Luego, se incrementó la cantidad de variables en el análisis, lo cual generó el surgimiento de los enfoques hidráulicos, eco-hidráulicos y holísticos, en orden ascendente de factores necesarios para su utilización. En la presente sección, se realizará una breve explicación de los métodos más utilizados para estimar el caudal ecológico en un río, agrupado en los cuatro enfoques mencionados.

MÉTODOS HIDROLÓGICOS

Los métodos de enfoque hidrológico son un procedimiento rápido y económico de estimar un valor de caudal ecológico. Para obtener este resultado, se requiere del historial de caudales de una cuenca, el cual se puede representar mediante curvas de duración, porcentajes estadísticos, líneas de tendencia, etc. Asimismo, previo a su aplicación, se requiere elaborar un análisis para comprobar que las condiciones de la zona de estudio sean análogas con la corriente de agua donde se desarrolló el método, debido a las asunciones que los investigadores consideraron durante su determinación. Esto es reforzado por la Autoridad Nacional del Agua, la cual indica que los métodos hidrológicos manejan parámetros regionales obtenidos mediante muestreos en una zona de estudio en particular (2015). A continuación, se detallarán los siguientes métodos: Tennan, New England Aquatic Base Flow, método del NGRPR, 7Q10, caudal medio mensual, Hoppe y 90% de Excedencia.

Método de Tennan

Para la elaboración de este método, también llamado Método de Montana, se evaluaron once ríos de EE.UU. en los estados de Montana, Nebraska y Wyoming. De estos, se obtuvo un total de 58 secciones transversales, de las cuales se consideraron parámetros como ancho,

profundidad, sustratos, temperatura, lecho, cobertura vegetal, entre otros. Con estos factores, se determinó el porcentaje de caudal anual necesario según la calidad de hábitat buscada (Aguilera & Pouilly, 2012). Tennan divide el año en dos periodos, los cuales representan las épocas de avenida y estiaje, y asigna el porcentaje que constituye el caudal ecológico para ellos (1976).

La aplicación de este método requiere de una evaluación previa de las características hidrológicas para verificar que sean compatibles con las zonas de estudio utilizadas por Tennan. Posterior a ello, se utiliza la siguiente tabla de recomendación de caudal propuesta por el autor.

Tabla 2.

Regímenes de caudal para peces, vida silvestre, recreación y recursos ambientales relacionados

Descripción del flujo	Caudal Recomendado	
	Octubre-Marzo	Abril-Septiembre
Máximo	200%	200%
Rango Optimo	60%-100%	60%-100%
Sobresaliente	40%	60%
Excelente	30%	50%
Bueno	20%	40%
Malo o Degradante	10%	30%
Pobre o Mínimo	10%	10%
Degradación Severa	10%-0%	10%-0%

Fuente: Tennant (1976)

Método New England Aquatic Base Flow

La propuesta de este método es la división del año en tres temporadas, en las cuales se recomienda como caudal ecológico a la mediana de un histórico de caudales medios de los siguientes meses.

Tabla 3.

Recomendaciones de caudal medio para tres periodos del año

Periodo	Caudal medio recomendado
Octubre-Febrero	Febrero
Marzo-Mayo	Marzo/Abril
Junio-Septiembre	Agosto

Elaborado a partir de: Autoridad Nacional del Agua (2015)

Método del NGPRP (Northern Great Plains Resource Program)

Este método fue elaborado con el objetivo de proteger a las especies salmónidas y procesa los datos de un histórico de caudales en una curva de duración. A partir de esta, se determinan los caudales de 90% y 50% de persistencia y se establecen para los meses secos y húmedos, respectivamente (Flachier, 2016).

Rafael Heras

Para determinar el caudal ecológico se requiere, en primer lugar, obtener el caudal medio mensual de los tres meses consecutivos más bajos. Este método propone como el flujo mínimo al 20% del valor hallado anteriormente. (Brown, 2016).

Método 7Q10

Este método evalúa las temporadas de sequía de un río en un histórico de caudales y utiliza el menor valor medio en siete días consecutivos como el caudal mínimo para un periodo de retorno de diez años (Corporación Autónoma Regional del Quindío, 2011).

Método del caudal medio mensual

Este método, el cual fue creado por el Servicio de vida silvestre de los Estados Unidos de América, propone que el caudal ecológico se puede estimar mediante el promedio del flujo mensual del mes más seco. Para ello, se requiere de un registro de caudales medios de un mínimo de 25 años (Flachier, 2016).

Método de Hoppe

Este método utiliza la curva de duración de un río y la relaciona con las temporadas en la vida de una especie, así como sus requerimientos para que se den de manera óptima. Por ello, el método divide las temporadas en función a la especie y sus necesidades de la siguiente manera: para periodos de avenida y limpieza de sustrato, se requiere caudal con 17% de persistencia (Q_{17}); para preservar el hábitat de manera óptima para el desove, caudal con 40% de persistencia (Q_{40}); para mantener las condiciones de alimento y abrigo, caudal con 80% de persistencia (Q_{80}) (Castro, Carvajal, & Monsalve, 2006).

El presente método se debe evaluar previo a su aplicación debido a que las especies afectadas pueden poseer características que difieran con las visualizadas durante la elaboración de la presente metodología.

Método del 90% de excedencia

Este método requiere de un registro de caudales históricos para producir la curva de duración de caudales del río de análisis. A partir de esta, se determina aquel que posee un 90% de persistencia y se establece como el mínimo que debe mantenerse (Autoridad Nacional del Agua., 2015).

MÉTODOS HIDRÁULICOS

Los métodos agrupados en el enfoque hidráulico emplean la relación entre variables como: la velocidad, el perímetro mojado, el tirante, la sección del río y el caudal circulante. Este grupo de métodos representan un avance en la evolución del cálculo del caudal ecológico respecto a los métodos de enfoque hidrológico, ya que estos analizan las variaciones de los caudales y el impacto que generan en las características del cauce del río y de las condiciones de desarrollo o supervivencia de las especies que habitan en el cuerpo de agua. Sin embargo, a pesar de que este grupo de métodos incluyen nuevos parámetros que intervienen en el cálculo del caudal ecológico, no se incluye una variable que represente a las especies acuáticas (Castro et al., 2006).

Método del perímetro mojado

Este método relaciona en una sección de análisis la superficie inundada o “mojada” con el caudal que fluye por la sección del río. Adicionalmente, este método asume que el mantenimiento del hábitat se encuentra directamente relacionado a la magnitud de la variable hidráulica mencionada. Por otro lado, este método requiere, para una correcta aplicación, que la sección de estudio se encuentre en un rápido (Parker, Armstrong, & Richards, 2004). Finalmente, se construyen las curvas de perímetro mojado vs caudal, en la cual se puede observar que para cierto volumen del agua, la pendiente se vuelve prácticamente cero (Villanueva & Alata, 2011). El caudal recomendado será aquel que se encuentre próximo al punto de inflexión.

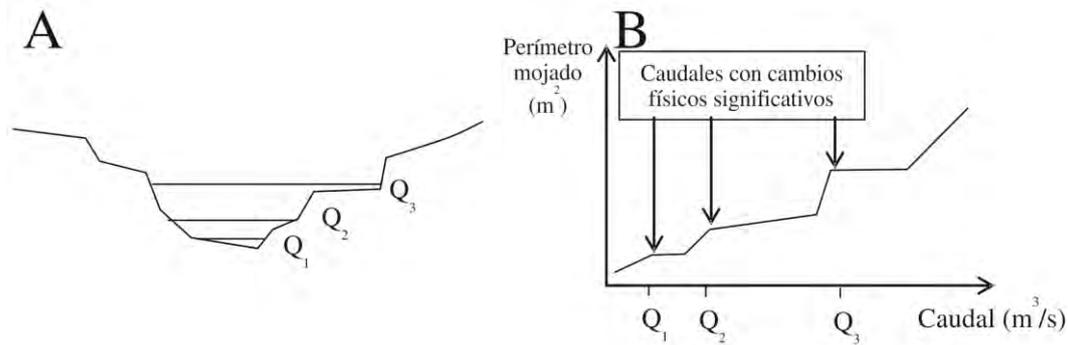


Figura 6. Gráfica de perímetro mojado vs caudal y sección transversal.
Fuente: Aguilera & Pouilly (2012)

R2Cross

Este método basa su análisis en el supuesto de que el flujo escogido para el mantenimiento del hábitat en un rápido es suficiente para asegurar la vida de los peces e invertebrados acuáticos en la zona cercana al punto de análisis. Además, este método incluye tres parámetros hidráulicos dentro del cálculo del caudal mínimo para cumplir con los requerimientos de protección de hábitat en rápidos. Dichos parámetros a utilizar son: profundidad promedio, porcentaje del perímetro mojado y velocidad promedio del flujo. Para evaluar el cumplimiento de la protección del hábitat, se emplea un criterio recomendado desarrollado en Colorado, lugar donde se originó este método.

Asimismo, se establecen requerimientos que varían según la estación del año en la que se esté aplicando. Por un lado, para el periodo de verano se recomienda cumplir con tres criterios mostrados en la tabla 4. Por otro lado, en invierno, para el caudal más bajo, se sugiere que se superen al menos dos criterios. Sin embargo, estas recomendaciones se encuentran adaptadas a la zona de desarrollo de los criterios (Colorado), por lo que será necesario verificar si la zona en la que se aplicará este método presenta un comportamiento estacional similar del lugar de origen del método o uno diferente para poder adaptarlo según sea necesario. (Gallo-vélez, 2016).

Tabla 4.

Criterios recomendados para las variables de R2CROSS según el ancho del río

Ancho promedio (m)	Profundidad promedio (m)	Perímetro mojado del cauce (%)	Velocidad promedio (m/s)
0.3-6	0.003-0.06	50	0.30
6-12	0.006-0.12	50	0.30
12-18	0.12-0.18	50-60	0.30
18-30	0.18-0.30	≥70	0.30

Fuente: Adaptado de Gallo-vélez (2016)

Método de múltiples transectos

Este método analiza diversos transectos de un río para estimar el valor de caudal ecológico del mismo. Para utilizarlo, se necesitan los datos de la velocidad, profundidad, sustrato y cobertura para las distintas secciones transversales analizadas, así como para diferentes valores de flujo que representen las distintas temporadas. Finalmente, se realiza una simulación hidráulica para visualizar los incrementos y disminuciones en los factores analizados. (Castro et al., 2006).

Método de Washington

El Método de Washington utiliza características hidráulicas de un río, como son la velocidad y profundidad, para las cuales se debe realizar una batimetría en distintas secciones transversales que sean distintivas de este cuerpo de agua. A partir de estos datos, se elaboran mapas que presenten las zonas aptas para los peces salmónidos, ya que es la especie más estudiada y, por ende, se posee una vasta información de sus preferencias (Flachier, 2016).

Método del Modelo Hidráulico

Este método realiza una simulación hidráulica, para la cual se requiere una previa recolección de valores de características físicas e hidráulicas, tales como cobertura vegetal, forma de fondo, profundidad, etc.

MÉTODOS ECO-HIDRÁULICOS

El enfoque eco-hidráulico agrupa los métodos, cuyo objetivo es determinar la aptitud del hábitat acuático en base a los requerimientos de una especie o un conjunto de estas y la

información hidrológica e hidráulica que posee el cuerpo de agua. En esta sección, se describirán dos métodos representativos de este análisis.

Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)

En los años 70, la U.S. Fish and Wild Service elaboró la metodología IFIM con la finalidad de determinar los efectos ambientales en las especies que dependen de los ríos a partir de un análisis de sus preferencias. Este método cuantifica la superficie potencialmente útil para la especie de análisis para distintos caudales circulantes mediante el siguiente procedimiento metodológico, que posee cinco fases secuenciales (Autoridad Nacional del Agua., 2015).

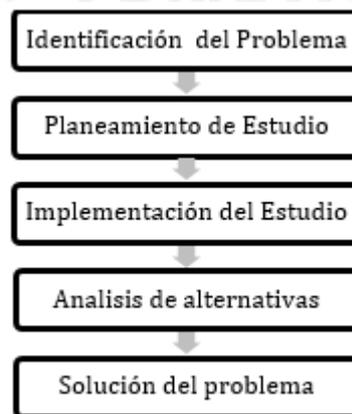


Figura 7. Flujo de trabajo IFIM
Elaborado a partir de: Autoridad Nacional del Agua (2015)

La primera fase es la identificación del problema, en la cual se examina las condiciones de la zona de estudio y se reconocen los puntos de conflicto. La siguiente fase es el planeamiento de estudio, donde se enlista la información necesaria para elaborar el método y se proyecta la manera de obtener aquella que no se encuentra disponible o completa. La tercera fase es la implementación del estudio, que prepara una simulación de hábitat para evaluar la competencia de un área delimitada mediante un índice cuyo valor va de 0 a 1. De los resultados consecuentes a la fase anterior, se proponen una serie de posibles alternativas de solución, las cuales deben analizarse. Finalmente, para concluir la última fase del procedimiento, las partes involucradas eligen la medida a accionar.

La información requerida para elaborar la simulación de hábitat es de carácter hidráulico y biológico, perteneciente al río y a la especie sensible, respectivamente. La primera es resultado de una simulación previa únicamente con información característica del río, como son el tirante

y la velocidad del flujo para valores de caudal específicos. La data biológica es procesada mediante curvas de preferencias, las cuales representan la afinidad de la especie de análisis a diferentes rangos de velocidad, profundidad y sustrato en las distintas etapas de su vida. La combinación de la data procesada permite la determinación del área potencialmente útil en relación con el caudal que atraviesa el cuerpo de agua (Flachier, 2016).

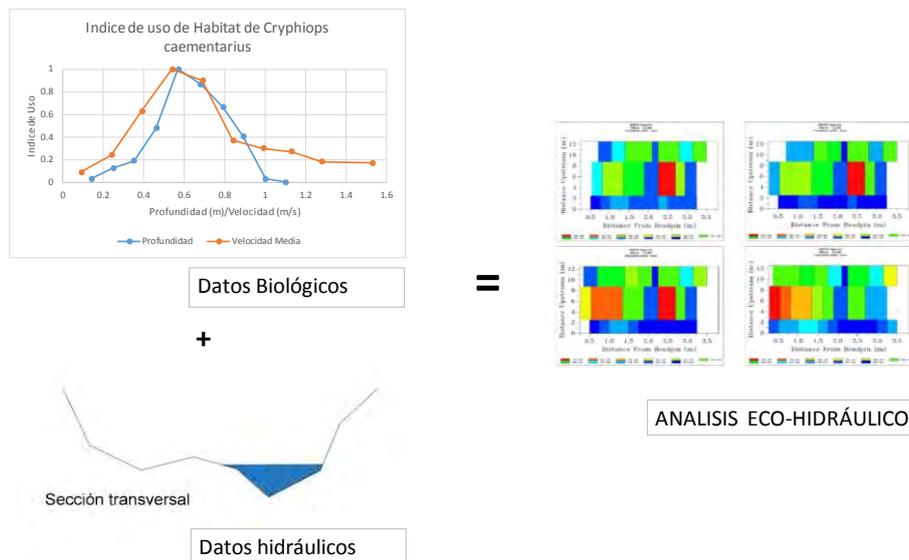


Figura 8. Esquema del funcionamiento del método IFIM
 Elaborado a partir de: Morales (2017); Quevedo (2017)

Método de Límites Ecológicos en las Alteraciones Hidrológicas (ELOHA)

Este método relaciona los aspectos ecológicos con las características generales que posee un grupo de ríos, como es la alteración del caudal, para determinar las posibles consecuencias que afectarán a las especies. A partir de estas, se proponen límites de utilización para mantener las condiciones naturales de los ecosistemas (Barrera, 2018). Para la elaboración del método ELOHA, se siguen los siguientes tres procesos secuenciales que permiten estimar un caudal ambiental: proceso científico, proceso social y proceso de monitoreo y evaluación. El primero se refiere a la recolección y evaluación de la información hidrológica necesaria de la zona de estudio, clasificación del río según su elevación e identificación de las posibles respuestas ecológicas ante alteraciones en el comportamiento del río. El segundo proceso consiste en fijar los rangos en el que pueden oscilar las características hidrológicas para mantener a los ecosistemas considerando los aspectos social y económico. Finalmente, el tercer proceso le da un carácter adaptativo al método, ya que, mediante monitoreos y otras investigaciones, se

ajustan los dos procesos anteriores para llegar a un valor que se adapte a los objetivos, los cuales pueden variar.

MÉTODOS HOLÍSTICOS

En la década de los noventa, se desarrollaron los métodos holísticos, los cuales requieren de una investigación exhaustiva debido a que involucran en su análisis factores hidrológicos, hidráulicos y biológicos, así como información sobre la calidad de agua y condiciones sociales y económicas.

Building Block Methodology (BBM)

El método BBM fue elaborado por expertos de distintas especialidades en Sudáfrica, con la finalidad de presentar un análisis que no solo considere a la vegetación ribereña, características hidráulicas, la ecología acuática, etc., sino que involucre también los aspectos sociales y económicos para la determinación de un valor de caudal ecológico (Flachier, 2016). Adicionalmente, King y Louw indican que este método asume lo indicado en la siguiente tabla

Tabla 5.
Asunciones optadas por King y Louw para la aplicación del método BBM

1	Los caudales son una característica normal de un río y las especies ya se encuentran adaptadas a las fluctuaciones en el flujo de agua y esta no debería afectar su supervivencia. Sin embargo, caudales que no son característicos de los ríos pueden generar alteraciones en el sistema y modificar su funcionamiento natural.
2	La identificación e inclusión de los elementos más importantes del régimen natural del río en los caudales modificados facilitará el mantenimiento de las especies biológicas y el funcionamiento natural del río.
3	Algunos tipos de flujo pueden influenciar en la morfología del canal, su correcta identificación e inclusión en los regímenes modificados permitirá mantener la estructura natural del cauce y la biodiversidad presente.

Elaborado a partir de King y Louw (1998)

3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se presentará la información necesaria para la aplicación de las metodologías a utilizar en la investigación para determinar el caudal ecológico. En primer lugar, se describirá el área de estudio, ubicación, características topográficas, entre otras. Luego, se presentara a la especie sensible elegida para el análisis y los motivos de su elección. Asimismo, se mostrarán la información recolectada en campo y los registros históricos obtenidos de la estación Raca Rumi. Por último, se detallará la información necesaria para modelar el tramo del rio analizado y obtener un valor de caudal ecológico mediante el software PHABSIM.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El lugar de estudio para esta investigación se encuentra en la cuenca Chancay-Lambayeque, esta nace en la cordillera occidental de los andes a partir de 4 lagunas: Morococha, Lejiacocha, Aforjacochoa y Misacocha (Observatorio de la Cuenca Chancay-Lambayeque, 2017). A continuación, se mostrará una tabla que resume las principales características topográficas de la cuenca.

Tabla 6.
Características topográficas de la cuenca Chancay-Lambayeque

Característica	Unidad	Valor
Área superficial	km ²	5555.49
Altitud media	Msnm	1622.00
Pendiente media	Adimensional	0.35
Factor de forma	Adimensional	0.27
Coefficiente de compacidad	Adimensional	1.92

Elaborado a partir de Observatorio de la Cuenca Chancay-Lambayeque (2017)

La zona de análisis se ubica en un tramo del rio inmediatamente después de la bocatoma Raca Rumi, cuyas coordenadas geográficas son 687395 (E) y 9267275 (N). Esta estructura es una de las principales obras hidráulicas de captación que alimentan al reservorio Tinajones.



Figura 9. Bocatoma Raca Rumi
Fuente: Google Earth, 2016

3.2 ENFOQUE HIDROLÓGICO

El primer grupo de métodos que se emplearán para determinar el caudal ecológico en el tramo de análisis del río Chancay-Lambayeque necesita como información inicial datos hidrológicos del río. Estos se tratarán de manera distinta según el método a aplicar y se obtendrá un valor de caudal ecológico para cada uno de ellos. A continuación, se describirá la información requerida para los métodos de este enfoque, los datos reales correspondientes a la zona de estudio y el procedimiento para obtener el caudal ecológico

3.2.1. DATOS RECOLECTADOS

La información mostrada a continuación es de carácter hidrológico, ya que las metodologías agrupadas bajo este enfoque no requieren de una mayor cantidad de variables para determinar el valor del caudal ecológico en la zona de aplicación del método. Los datos recolectados en esta investigación muestran un registro histórico de los caudales que circulan en el tramo de análisis. Dicha información fue proporcionada por la junta de usuarios del departamento de Chiclayo, quien se encarga de registrarlos en sus diferentes puntos de monitoreo. En esta investigación, se utilizó la data recolectada por la estación Raca Rumi, ubicada en las coordenadas 687346.1 (Este) y 9267331.0 (Norte), zona 17M, y a una altitud de 287 m.s.n.m.

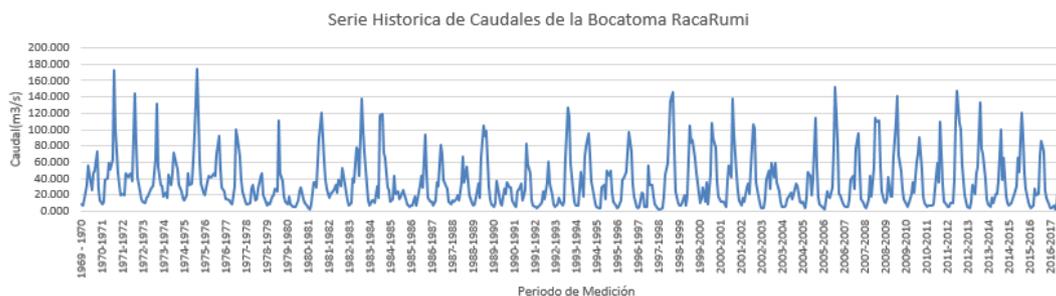


Figura 10. Serie Histórica de caudales en la estación Raca Rumi

Como se puede apreciar en la figura anterior, se cuenta con datos hidrológicos disponibles desde el año 1969, por lo que son un total de 48 años que se encuentran detallados en el **Anexo 1** del presente documento.

3.2.2. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN

Se elaboraron curvas de duración e hidrogramas con la información recolectada en la estación de registro Raca Rumi, según lo requiera el método hidrológico a utilizar. Cabe resaltar que la data corresponde al flujo de agua justo después de la bocatoma Raca Rumi.

3.3 ENFOQUE ECO-HIDRAULICO

Los métodos de enfoque eco-hidráulico poseen un alto nivel de exigencia en la recolección de información, ya que esta corresponde a los diferentes aspectos que se involucran en el análisis. A continuación, se detallarán los datos que se necesitan recolectar, así como el procedimiento a seguir para la estimación del caudal ecológico mediante el software PHABSIM.

3.3.1. DATOS RECOLECTADOS

La información recopilada que se requiere para modelar en PHABSIM es de carácter hidrológico, biológico y morfológico, los cuales se describen a continuación.

DATOS HIDROLÓGICOS

El enfoque eco-hidráulico requiere una serie de caudales máximos y mínimos, así como algunos valores intermedios, para poder elaborar una simulación de la zona de estudio que represente las condiciones naturales de la misma. En la presenta investigación, se utilizó la información obtenida de la estación de registro Raca Rumi.

DATOS BIOLÓGICOS

Para la elaboración del método, se requiere identificar a la especie sensible, así como tener información sobre sus preferencias para las etapas de vida que se desean evaluar. Para la presente investigación, se seleccionó a la Trucha Arcoíris, que se introduce a continuación.

Trucha Arcoíris

La trucha arcoíris es un pez nativo de las zonas que comprenden los territorios de Alaska, Norteamérica y México (FAO, 2009), específicamente de los ríos que pertenecen a la vertiente del Pacífico. Esta especie pertenece a la familia Salmonidae y puede vivir en agua dulce y salada. En el año 1941, se siembra por primera vez de manera exitosa en nuestro país cincuenta truchas Arcoíris en la provincia de Junín (El Comercio, 2014). Esta especie es de gran importancia para los peruanos y una de las más consumidas.

Tabla 7.
Clasificación taxonómica – Trucha Arcoíris

Taxa	Ítem
Reino	Animalia
Clase	Actinopterygii
Familia	Salmonidae
Género	Oncorhynchus
Especie	Mykiss

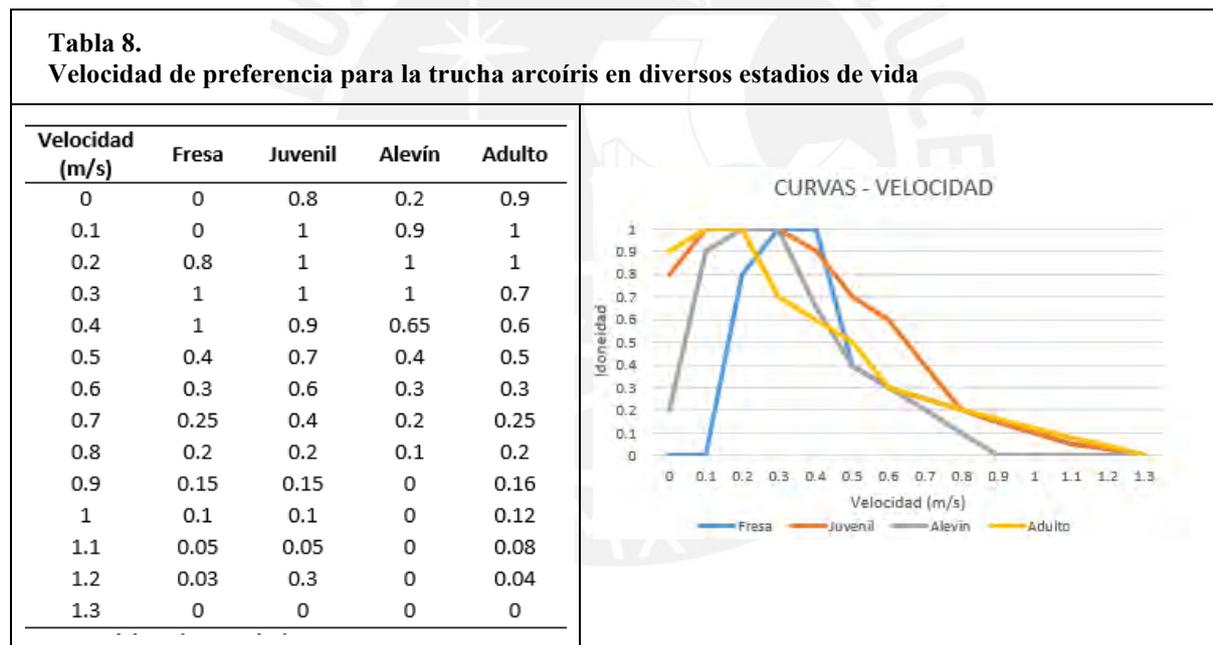
Fuente: Chávez, Lara (2019)

Cabe resaltar que, se consideró importante la estimación de un caudal que asegure la conservación de la trucha arcoíris, ya que, según el Ministerio de Producción, se visualizó un evidente incremento de 678% en su producción nacional entre los años 2007 y el 2017 (Gestión, 2018).



Figura 9. Curvas de preferencia del Camarón de Río
Fuente: El economista (2015)

En la presente investigación, se procesarán las preferencias de la especie respecto a características hidráulicas, como son velocidad y profundidad, en sus cuatro etapas de vida: fresa, juvenil, alevín y adulto. Para ello, se utilizaron las siguientes tablas obtenidas del estudio de Moscoso (Moscoso del estudio de García de Jalón).



Fuente: Elaborado a partir de Moscoso 2012

Tabla 9.
Profundidad de preferencia para la trucha arco iris en diversos estadios de vida

Profundidad (m)	Fresa	Juvenil	Alevín	Adulto
0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0
0.2	0.5	0	0.6	0
0.3	0.9	0.8	1	0.5
0.4	1	1	1	0.6
0.5	0.9	1	0.9	0.7
0.6	0.7	1	0.8	0.8
0.7	0.2	1	0.3	0.9
0.8	0	1	0.2	1
0.9	0	1	0.1	1
1	0	1	0	1
1.1	0	1	0	1
1.2	0	1	0	1
1.3	0	1	0	1

Fuente: Elaborado a partir de Moscoso 2012

Por último, se presenta una tabla con información relacionada al índice de canal para la especie sensible. En esta, se muestra una clasificación de seis tipos de sustratos diferenciados por su tamaño (finos, arenas, gravillas, gravas, bloques y rocas).

Tabla 10.
Datos Preferencia del Índice de Canal

Estadio	1 Finos	2 Arenas	3 Gravillas	4 Gravas	5 Bloques	6 Roca
Freza	0	0.2	1	0.2	0	0
Alevines	0	0.02	1	0.3	0.02	0
Juveniles	0	0	0.9	0.4	0.1	0
Adultos	0	0.2	0.9	1	0.6	0.25

Fuente: Rustarazo M. (2000)

DATOS MORFOLÓGICOS

En la zona de estudio, se debe elaborar un levantamiento de las secciones del tramo de análisis que resulten representativas y determinar la pendiente longitudinal del río que se presente entre las secciones. El procedimiento para obtener los datos dependerá de la cantidad de caudal que circule al momento del levantamiento.

El procedimiento para la obtención de las secciones transversales consiste en obtener la profundidad del fondo del río respecto a un nivel de referencia, estas mediciones se realizarán

en con ayuda de una subdivisión transversal de la sección. Dicha separación tendrá una longitud aproximada de 10% del ancho total del río, salvo que se requiera precisar con una mayor exactitud algún tramo de la sección. Para visualizar esta subdivisión, se colocará una cuerda paralela a la sección del río a registrar, se tensará y se marcarán las divisiones en las cuales se deberá tomar una medición como se muestra en la figura 12. La profundidad será registrada con ayuda de un nivel topográfico y una regla.

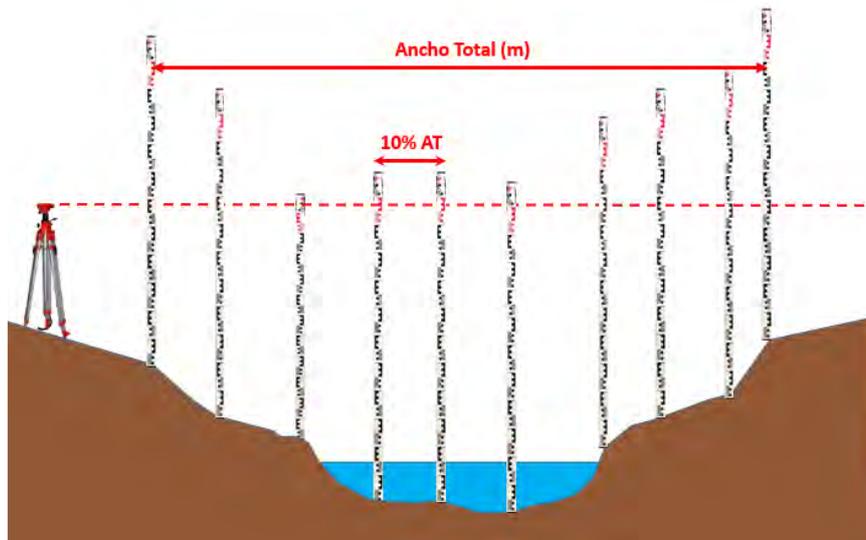


Figura 11. Esquema de la distribución de toma de datos.

La pendiente longitudinal entre las secciones de análisis se puede determinar con ayuda de un nivel y una regla. Para esto, cada uno de los instrumentos se posiciona en secciones adyacentes y se registran el desnivel y la distancia horizontal entre ambos puntos como se muestra en la figura 13.

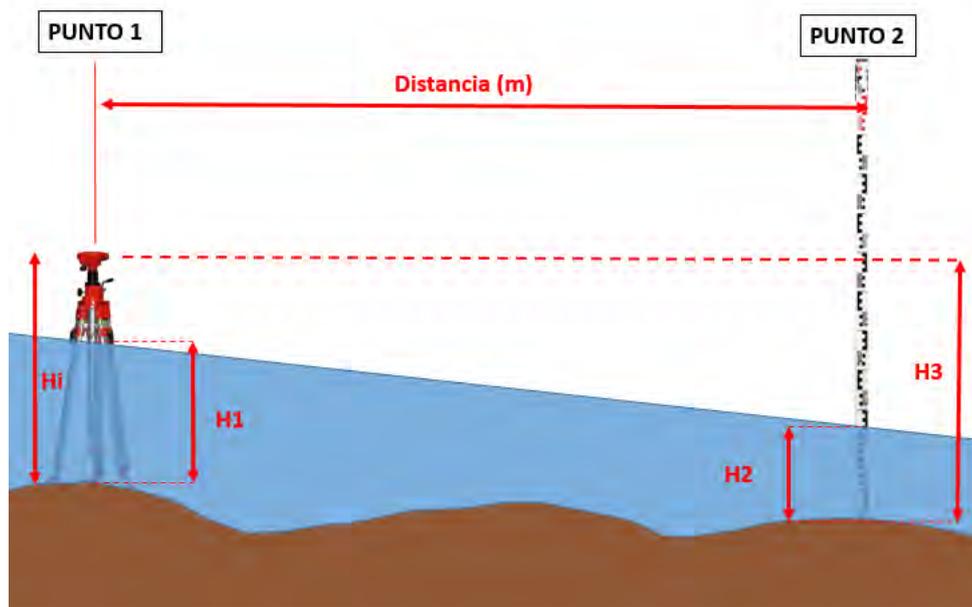


Figura 12. Esquema de distribución de datos.

Cabe resaltar que, la pendiente a registrar es de la superficie del agua, ya que el fondo presenta irregularidades que pueden arrojar un resultado erróneo. Esto quiere decir que el desnivel a medir será respecto a la superficie en ambas secciones de análisis con la ecuación mostrada a continuación.

$$Pendiente = \frac{(H_3 - H_2) - (H_i - H_1)}{D} \quad (3.1)$$

Donde:

H_i : Altura del equipo

H_1 : Altura del agua en el punto 1 (tirante)

H_2 : Altura del agua en el punto 2 (tirante)

H_3 : Altura desde el fondo hasta el nivel en el punto 2

D : Distancia horizontal entre los puntos 1 y 2

Sin embargo, para esta investigación, debido a limitaciones económicas y a la poca accesibilidad a la zona de análisis con equipo especializado, las mediciones se realizaron con una vara de profundidad, la cual es un instrumento largo y rígido que presenta en uno de sus lados marcas de graduación. Primero, se introduce la vara en la sección del río y se registra la profundidad, este proceso se repite a lo largo de la sección transversal del río en cada una de las marcas de subdivisión previamente colocadas en la cuerda. Para esta recolección de datos,

las mediciones se realizaron cada metro. Del mismo modo, debido a las restricciones expuestas anteriormente, la pendiente longitudinal se extrajo de lo indicado en el documento “Tratamiento de cauce del río para control de inundaciones en la cuenca Chancay Lambayeque” para los tramos entre la Bocatoma Raca Rumi y el partidor La Puntilla, cuyo valor es de 0.61% (ANA, 2010).



Figura 13. Proceso de recolección de datos en la sección

En la figura 14, se muestra el proceso de recolección de datos in situ en las diferentes secciones de análisis del río de estudio. Los datos obtenidos se muestran al final de este documento. Adicionalmente se muestra, a continuación, el gráfico de una de las secciones del río.



Figura 14. Sección del río analizado

Adicionalmente, se observó que el río se encuentra contenido en una misma sección lateral para los diferentes caudales mostrados a continuación en las siguientes imágenes que corresponden a los años 2018 y 2016 respectivamente.



**Figura 15. Sección del tramo en años anteriores.
Extraído de Google Earth**

Para finalizar, se estimó el coeficiente de Manning mediante el uso de tablas que relacionan el material del fondo con el parámetro en cuestión. Como se puede apreciar en la Figura 17, el material predominante en el fondo son cantos rodados con presencia de gravas. Además, se presenta una pendiente transversal elevada con abundante vegetación a los costados del cauce.



Figura 16. Zona de análisis en el río chancay y composición del fondo del cauce

Se utilizó la tabla de Valores de coeficiente de Manning del libro “Hidráulica de canales abiertos” de Ven Te Chow (Ver Tabla 11), en la cual, se muestra que un río con las características mencionadas presenta un coeficiente de Manning normal de 0.040.

Tabla 11.
Tabla de Coeficientes de Rugosidad

	Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
	b. Corrientes montañosas sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
	1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
	2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2	Planicies de inundación			
	a. Pastizales sin matorrales			
	1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
	2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
	b. Áreas cultivadas			
	1. Sin cultivo	0.200	0.030	0.040
	2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
	3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
	c. Matorrales			
	1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
	2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
	3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
	4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
	5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
	d. Árboles			
	1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
	2. Terreno limpio con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
	3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
	4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
	5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3	Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente >100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
	a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	...	0.060
	b. Sección irregular y rugosa	0.035	...	0.100

Fuente: Ven te Chow (1994)

Asimismo, se corroboró el valor obtenido con el determinado por la Autoridad Nacional del Agua en su informe “Tratamiento de Cauce del río para el control de inundaciones de la cuenca Chancay – Lambayeque” (ANA, 2010), donde se obtuvo un rango de valores entre 0.035-0.050 para el tramo entre la bocatoma Raca Rumi y el partidur La Puntilla, como se puede apreciar en la siguiente tabla. De esta manera, se verifica que la selección del coeficiente de Manning es acertada.

Tabla 12.

Rango de valores de coeficiente de Manning para tramos del río Chancay - Lambayeque

Zona	Cauce
Tramo puente San Carlos a bocatoma Raca Rumi	0.045 - 0.060
Tramo bocatoma Raca Rumi al partidador La Puntilla	0.035 - 0.050
Tramo partidador La Puntilla a bocatoma Monsefú - Eten	0.033 - 0.045
Tramo bocatoma Monsfú - Eten al mar	0.030-00040

Fuente: Elaborado a partir de ANA (2010)

DATOS DE CALIBRACIÓN

La conducta simulada del flujo del río requiere ser verificada en la etapa de modelación para confirmar que esta represente el comportamiento en la realidad. Por ello, será necesario recopilar información hidráulica como el caudal, la velocidad y el tirante al momento de la recolección de datos en campo. Con esta información, se calibra el modelo y se permite la ejecución de los caudales simulados.

Para la determinación del caudal de calibración, correspondiente al obtenido en la visita a campo, se utilizó el método del flotador para aforos en canales. Este método permite obtener un flujo aproximado de manera sencilla, para lo cual se requiere estimar la velocidad del agua y el área del canal. El proceso seguido se basó en el Manual N° 5 Medición de agua del Ministerio de Agricultura (MINAGRI) y se detalla a continuación:

Primero, se definió un tramo de longitud igual a diez metros, en el cual se aplicarían las mediciones. Luego, se colocó una esfera sobre la superficie del río y se procede a registrar el tiempo que se demora en recorrer la distancia previamente definida. Este proceso, se repitió diez veces. A continuación, se presenta una tabla con los valores de tiempo recolectados en la durante el trabajo de campo de la presente investigación.

Tabla 13.
Tiempos de recorrido recolectados

TIEMPOS	
T1	7.1
T2	8.6
T3	8.0
T4	9.4
T5	7.4
T6	10.5
T7	11.3
T8	8.6
T9	8.6
T10	9.5

A partir de estos datos, se obtuvo un tiempo promedio de recorrido de 8.9 segundos. Con este valor, se determinó la velocidad media al dividir la longitud del tramo entre el tiempo. Es necesario indicar que, a la velocidad obtenida se le aplicó un factor de corrección de 0.7 según el manual mencionado anteriormente.

$$Velocidad = \frac{10.0 \text{ m}}{8.9\text{s}} = 1.12\text{m/s} \quad (3.2)$$

$$Velocidad \text{ Corregida} = Velocidad \times 0.7 = 0.79\text{m/s} \quad (3.3)$$

Con la velocidad obtenida y el área de la sección, se procedió a determinar el caudal circulante al momento de la toma de datos en el punto de estudio.

$$Caudal = Velocidad \times Area = 0.79\text{m/s} \times 12.01\text{m}^2 = 9.50\text{m}^3/\text{s} \quad (3.4)$$

Es necesario aclarar que la medición de las velocidades se realizó en la zona más honda del canal de la primera sección aforada. Solo se considera los valores obtenidos en esta para la determinación del caudal, debido a que el tirante presenciado en la otra zona era mínimo y el lecho rocoso generaba que el objeto utilizado para el método de flotación sea interrumpido.



Figura 17. Fondo de la zona izquierda del río.

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

En el presente capítulo, se detallará el procedimiento de cálculo realizado para obtener los caudales ecológicos para los métodos hidrológicos de análisis escogidos: New England Aquatic Base Flow, Caudal medio mensual, Caudal con 90% de Excedencia, Método de Rafael Heras y Método de Tennan. Asimismo, se explicará la metodología de ingreso de datos al software PHABSIM, correspondiente al enfoque eco-hidráulico

4.1 ENFOQUE HIDROLÓGICO

Los métodos a utilizar en este enfoque serán el New England Aquatic Base Flow, Caudal medio mensual, Caudal con 90% de Excedencia, Método de Rafael Heras y Método de Tennan. Se seleccionaron estos métodos debido a las limitaciones de la información obtenida, ya que los caudales presentados en los registros históricos son mensuales y algunos métodos exigen caudales diarios para su aplicación o están estrechamente relacionados a su lugar de desarrollo y no son aplicables salvo a locaciones con características muy similares. A continuación, se detallará el proceso a seguir para la obtención del caudal mínimo o ecológico para los métodos mencionados.

4.1.1. NEW ENGLAND AQUATIC BASE FLOW

Como se mencionó en la sección de revisión de la literatura, este método divide el año en tres periodos: de octubre a febrero, de marzo a mayo y, por último, de junio a septiembre. Luego, asigna un caudal ecológico representativo a cada periodo. Sin embargo, las recomendaciones de caudal ligadas a cada etapa están directamente relacionadas con las épocas de avenida y estiaje del lugar de elaboración del método. El primer paso para su aplicación es obtener la mediana para cada mes del registro histórico y construir un hidrograma como se muestra en la figura 18.

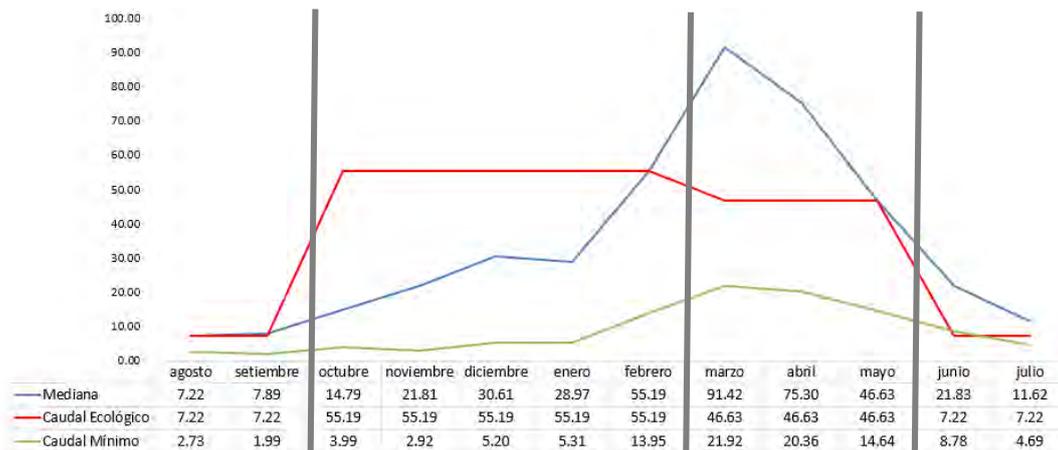


Figura 18. Hidrograma del método NEABF

A partir del hidrograma presentado, se determinó que, para el periodo de octubre a febrero, el caudal ecológico a seleccionar es el caudal mensual presentado en el mes de febrero; para los meses de marzo hasta mayo, se tomará en cuenta el caudal de mayo; y, por último, para el periodo de junio-septiembre, se tomará como caudal ecológico el presentado en el mes de agosto como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 14.

Valores de Caudal ecológico para cada periodo

Periodo	Valor de Caudal Ecológico (m ³ /s)
Octubre- Febrero	55.19
Marzo-Mayo	46.63
Junio-Septiembre	7.22

4.1.2. CAUDAL MEDIO MENSUAL

Este método asume como caudal ecológico al mínimo caudal promedio que se presente en el mes más seco para un registro de más de 25 años. La información recolectada corresponde a un registro de 48 años por lo que se cumple la condición para aplicación del método. El primer paso consiste en realizar un promedio de los caudales por mes para todos los años del registro y, luego, se escoge el menor de estos como caudal ecológico. En la figura 19, se identifica que el caudal mensual con el mínimo valor corresponde al mes de octubre. En consecuencia, el caudal ecológico obtenido mediante la aplicación de este método será 8.6 m³/s para todo el año.

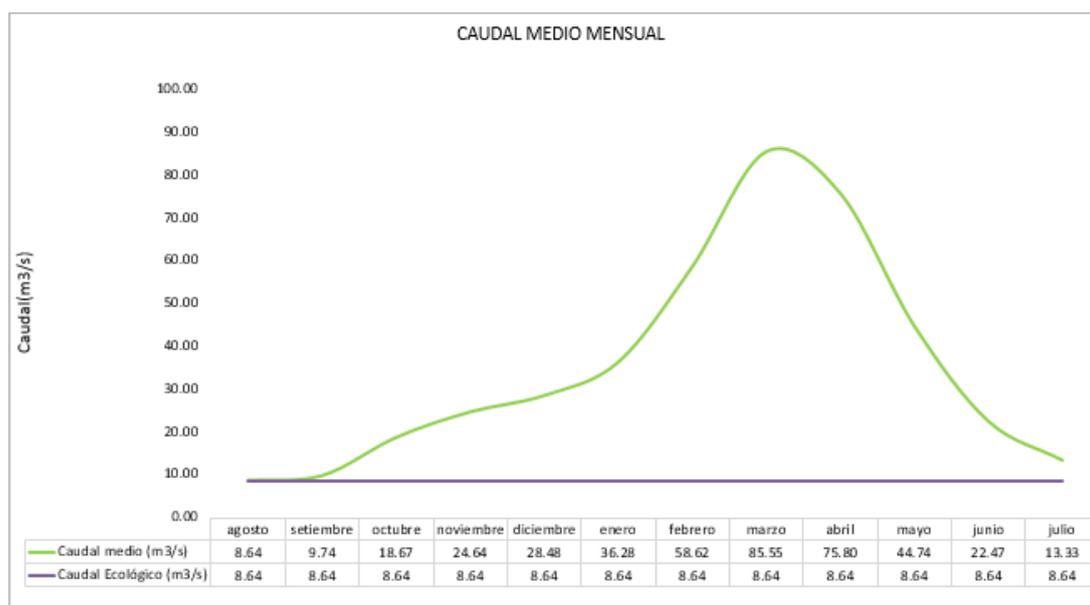


Figura 19. Hidrograma del caudal medio mensual

4.1.3. CAUDAL CON 90% DE EXCEDENCIA

Para este método, se utilizan los caudales mensuales del registro histórico. El primer paso es construir la curva de duración de caudales. Esta curva se obtiene ordenando de mayor a menor todos los caudales mensuales registrados y asignando a cada uno un número de orden iniciando por el caudal de mayor valor. Luego, al dividir el número de orden de un caudal entre el total de datos y multiplicado por 100 se obtiene el porcentaje de persistencia del caudal analizado. Se realiza este proceso para todos los caudales a fin de agruparlos en una gráfica de porcentaje de persistencia versus caudal y, de esta manera, se obtiene la curva de duración de caudales. El siguiente paso consiste en identificar el caudal que presente una persistencia de 90% en la CDC y asignarlo como valor del caudal ecológico para el río analizado.

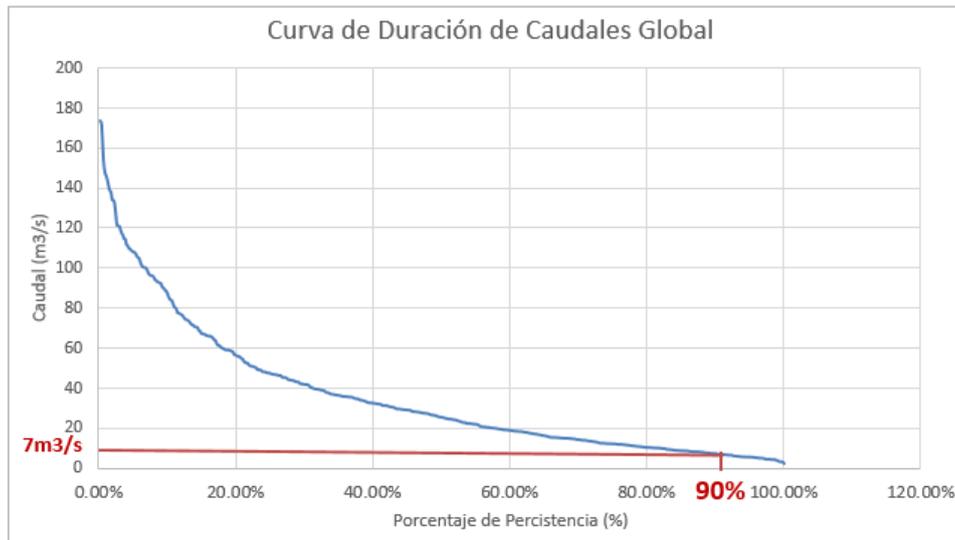


Figura 20. Curva de duración de Caudales



Figura 21. Hidrograma caudal ecológico – Método de 90% de Persistencia

4.1.4. MÉTODO DE RAFAEL HERAS

Este método estima el caudal ecológico como el 20% del caudal medio del año crítico. Dicho año se define como el periodo en el cual se presenta el promedio mensual más bajo de tres meses consecutivos. En el registro histórico, se identificaron los caudales consecutivos más bajos por cada año y, luego, se obtuvo el promedio de los mismos. A partir de este dato, se determina el año crítico y se obtiene el caudal ecológico como el 20% de este.

1990-1991	6.98	4.97	25.03	29.26	34.56	13.52	26.12	82.35	57.36	47.28	13.32	7.96	6.64
1991-1992	5.28	3.97	5.22	8.64	12.18	25.22	14.97	35.24	60.47	33.34	19.28	8.65	4.83
1992-1993	5.19	8.32	16.71	11.98	7.85	12.15	63.52	126.96	116.28	58.87	25.46	12.12	8.54
1993-1994	7.07	7.83	27.12	47.43	17.91	66.78	79.97	95.86	68.24	37.42	19.17	10.04	6.31
1994-1995	5.88	3.97	4.72	29.41	31.95	14.75	49.07	43.79	50.39	24.96	12.11	7.29	4.79
1995-1996	4.09	4.87	13.70	39.25	39.98	47.87	72.08	96.71	73.98	33.81	17.65	5.77	4.81
1996-1997	4.17	5.02	23.01	22.08	6.22	5.31	56.25	31.64	31.71	17.56	9.47	4.63	4.63
1997-1998	2.73	1.99	3.99	18.16	45.02	58.83	96.27	134.05	145.95	79.34	23.99	10.89	2.90
1999-2000	10.78	15.05	29.29	12.64	36.07	8.87	45.04	108.64	88.51	77.36	36.57	17.85	14.56
2000-2001	11.98	11.64	11.39	5.36	35.27	55.92	41.33	137.73	96.08	46.71	25.36	13.61	9.46
2001-2002	6.51	15.97	11.19	28.83	33.64	21.63	50.88	106.85	100.98	35.48	18.60	11.04	11.22
2002-2003	4.66	3.90	14.61	38.64	50.03	28.02	59.68	41.57	58.83	35.17	23.91	11.47	6.88
2003-2004	5.59	5.78	7.07	15.38	19.80	23.54	15.15	27.99	34.48	30.15	11.86	9.85	6.15
2004-2005	11.87	4.65	16.83	47.97	43.96	20.29	39.40	114.47	55.56	18.55	8.78	6.26	7.59
2005-2006	3.35	3.04	24.64	18.80	16.40	28.82	77.00	151.52	83.69	21.68	19.62	10.02	5.47
2006-2007	6.46	5.23	4.32	14.96	38.55	42.37	28.10	76.19	95.27	52.22	15.00	10.40	5.54

Figura 22. Esquema de datos con los caudales más bajos

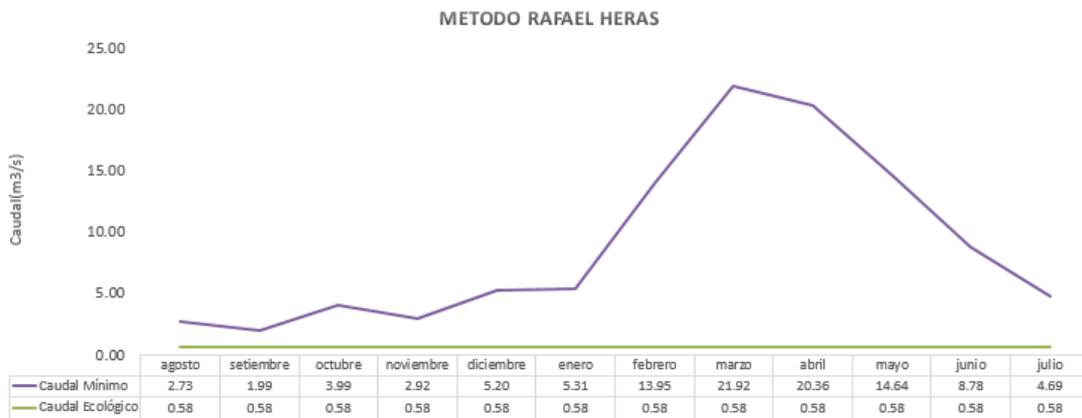


Figura 23. Histograma caudal ecológico – Rafael Heras

4.1.5. MÉTODO DE TENNAN

Este método propone como caudal ecológico a un porcentaje del caudal medio mensual, dicho porcentaje dependerá de las condiciones que se deseen mantener en el río. Para este método, se calcularán los caudales correspondientes las condiciones recomendable y excelente, con porcentajes de 30 y 60% del caudal medio respectivamente.

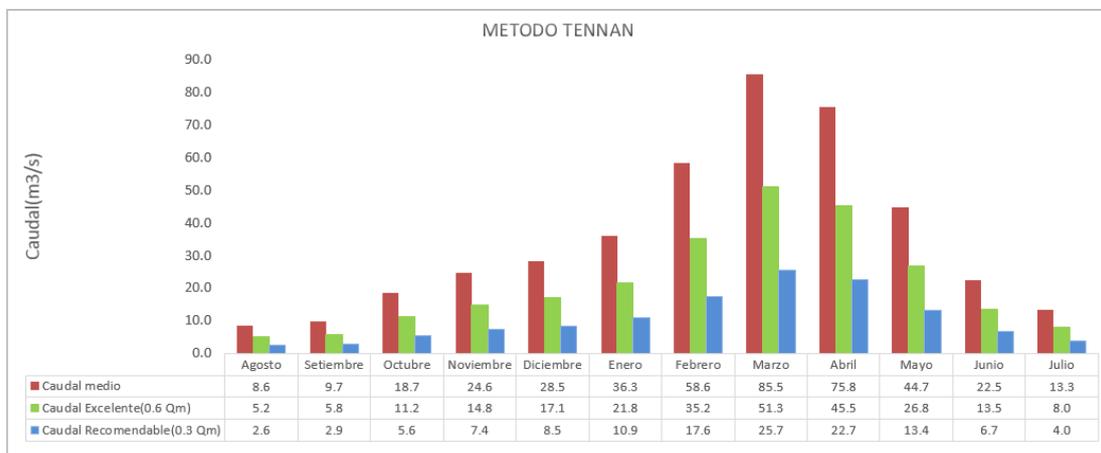


Figura 24. Caudales calculados con uso del método de Tennan

4.2 ENFOQUE ECO HIDRÁULICO

Para el enfoque eco-hidráulico, se utilizó el software PHABSIM, el cual presenta una metodología secuencial por módulos, que permite realizar el cálculo del caudal ecológico mediante la interpretación de curvas de hábitat potencialmente útiles (HPU). Estas, como se explicó en el capítulo de Metodología, representan la habitabilidad del área de estudio para las diversas etapas de vida de una especie considerada sensible. A continuación, se detalla el procedimiento de preparación y ejecución del modelo.

4.2.1. PREPARACIÓN DEL MODELO

En esta etapa, se ingresarán los datos recolectados en campo del río de estudio como: las secciones transversales, caudales de estudio, la pendiente longitudinal, el índice del canal, el coeficiente de rugosidad, entre otros. Asimismo, se ingresarán las curvas de preferencia de la especie a analizar. Antes de empezar con los datos de campo, se detallará el nombre del proyecto y la dirección donde se almacenarán los datos. En la siguiente figura se muestra dicha configuración del proyecto a desarrollar.

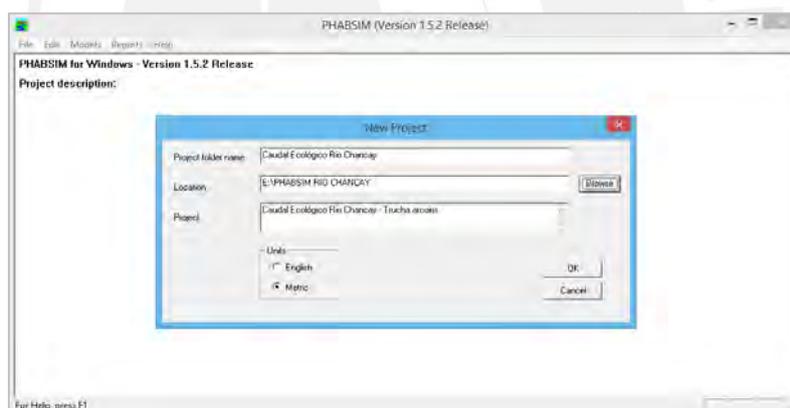


Figura 25. Programación inicial del programa PHABSIM

Datos Topográficos

En esta sección del programa, se ingresan los datos correspondientes a la sección transversal del río de estudio. Para acceder a esta ventana, se despliega el menú “Edit” y se selecciona la primera opción “Cross Section”. Al realizar este procedimiento, aparecerá la ventana mostrada en la figura 26 “Edit Cross Section Data”, en la cual se encontrarán tres opciones. En la primera pestaña, “Cross Section Data”, se enumeran y detallan algunas características principales de las secciones registradas en campo, las cuales se explicarán en la siguiente tabla.

Tabla 15.

Variables de Ingreso en la pestaña “Cross Section Data”

Variable	Descripción
Lenght	Distancia de una sección respecto a la anterior, para el caso de la primera sección ingresada se toma un valor de 0.
Upstream WF	Parámetro que indica la representatividad de la sección en el tramo de análisis. Si la sección a ingresar es un dato intermedio el valor de 0,5 representará que dicha sección representa el 50% del tramo anterior y posterior.
LeftBank y RightBank	Representan la extensión de las banquetas en cada lado del río.
SZF (Stage of Zero Flow)	Nivel que ocuparía la superficie libre del río si no presentara un valor de caudal.
N	Coeficiente de rugosidad de Manning de la sección. Para el software, se ingresará el valor de cero inicialmente en la pestaña en mención y se cambiará durante la calibración hidráulica.
Beta/D50	Este es un parámetro de calibración para el modelo MANSQ, que depende de la variación de la rugosidad y al igual que la rugosidad, se le colocará el valor de cero hasta que se realice la calibración, si es que se usa el modelo mencionado.
Slope	Pendiente hidráulica, que por defecto es cero, pero el programa lo modifica automáticamente luego de añadir las secciones.

Fuente: Elaborado a partir del Manual Phabsim

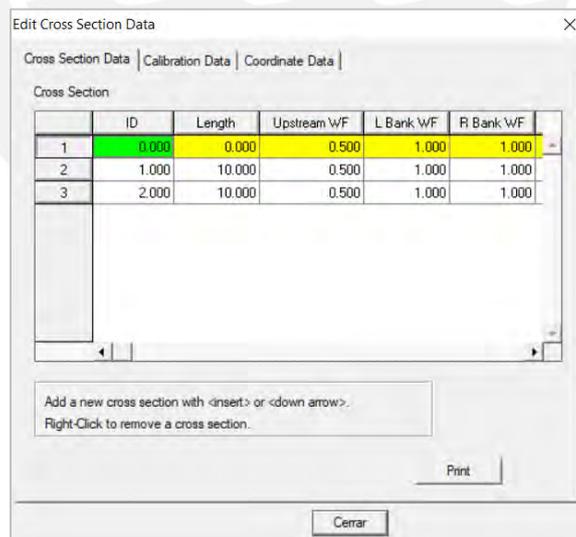


Figura 26. Ventana Edit Cross Section Data.

Luego, se ingresa a la pestaña “Calibration Data”, en la cual se digitará la información correspondiente a las condiciones de cada una de las secciones de análisis, así como los caudales que serán empleados para la calibración. Para ello, el programa requiere al menos tres

flujos entre los cuales se incluye el valor registrado durante la visita de campo. En la siguiente tabla se muestra la descripción de cada una de las columnas presentes en dicha ventana.

Tabla 16.

VARIABLES DE INGRESO EN LA PESTAÑA “CALIBRATION DATA”

Variable	Descripción
Left WSL (Water Surface Level)	Nivel de agua en la orilla izquierda de la sección
Right WSL	Nivel de agua en la orilla derecha de la sección
User WSL	Nivel de agua medio en la sección.
Best Esq Q (“Best estimation of discharge”)	Se trata de estimar el caudal en la sección durante la medición.
XsecQ	Es el caudal calculado mediante el método velocidad-área.

Fuente: Elaborado a partir del Manual Phabsim

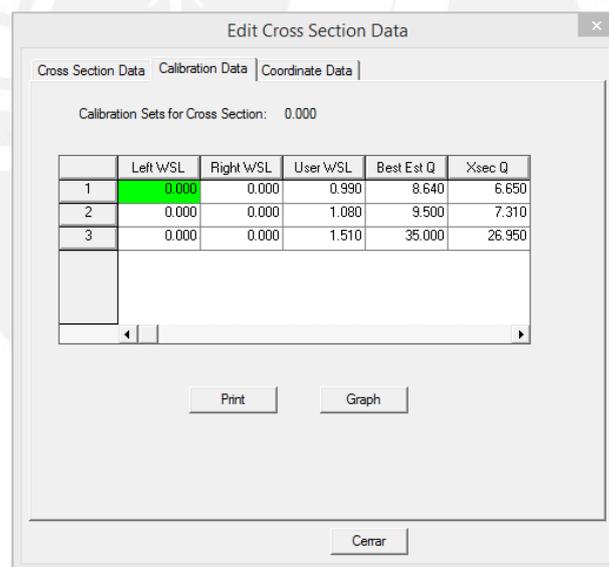


Figura 27. Ventana Calibration Data

Por último, para cada sección del canal, se ingresa a la pestaña “Coordinate Data”, en la cual se detallará la sección transversal del canal en ese punto. Para la investigación, se elaboraron mediciones del tirante a cada metro del canal, por lo que se tomaron alrededor de 40 puntos por cada una de las 3 secciones. Adicionalmente, el programa requiere de la velocidad como parámetro de entrada en cada uno de estos puntos para los tres flujos registrados. Como se explicó en secciones anteriores, solo se realizó una visita a campo, motivo por el cual la

información restante fue obtenida con ayuda del software HEC-RAS. En la figura 28, se observa la pestaña con los datos de la investigación digitados.

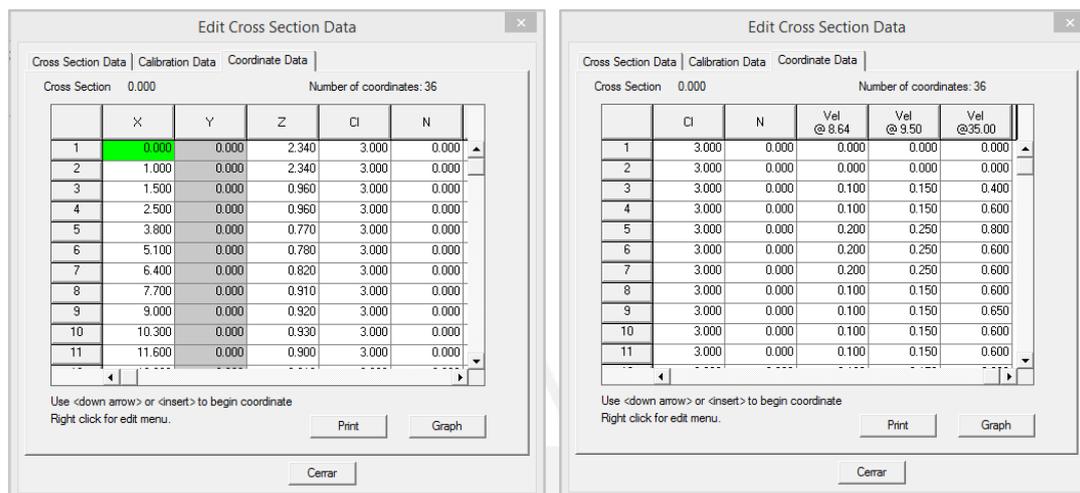


Figura 28. Edit Cross Section Data

Caudales

En esta sección, se introducirán los caudales de calibración y simulación. Para realizarlo, se despliega el menú “Edit” y se selecciona la opción “Discharges”. Se requieren tres caudales de calibración, como ya se mencionó anteriormente, los cuales son los siguientes: 8.64, 9.50, 35.00 m³/s. El primero corresponde al valor promedio mínimo del histórico de caudales. El segundo hace referencia al flujo presenciado durante la visita de campo. Por último, el tercero representa el caudal promedio del río de análisis. A continuación, se presenta una tabla resumen con la información mencionada.

Tabla 17.

Caudales de calibración

Caudales (m ³ /s)	
Calibración 1	8.64
Calibración 2	9.50
Calibración 3	35.00

Fuente: Propia

Adicionalmente, se incluirán varios caudales para que el programa realice una simulación. El conjunto de caudales se ingresa al programa como se muestra en la figura 29. Los que tengan terminación “cal” corresponderán a los caudales de calibración y los que son de tipo “sim”, a los caudales de simulación.

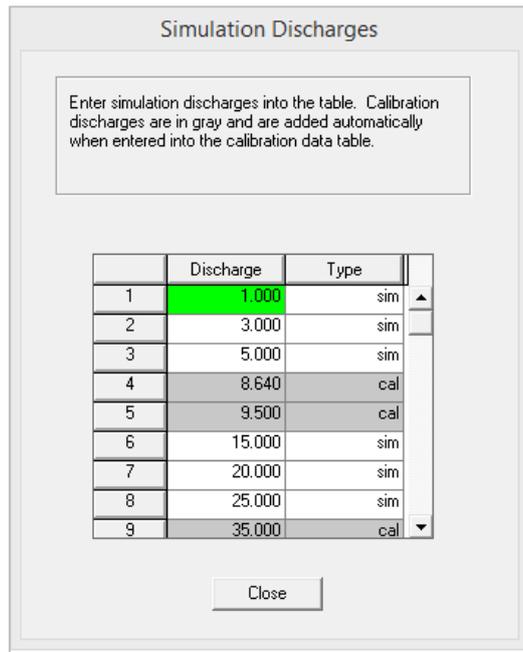


Figura 29. Pestaña Simulation Discharges del programa PHABSIM

Curvas de Preferencia

Son las condiciones de la especie a analizar en las que prefiere estar o las que necesita para sobrevivir. Para esta investigación, se relacionará dicho índice de habitabilidad con la profundidad, la velocidad e índice de canal. Los datos se ingresan al programa desde el menú “Edit” en la sección “Suitability Curves”. Aquí, se asigna un código de identificación, el nombre de la especie y a qué estadio de vida corresponde como se puede observar en la siguiente figura. Este proceso se repetirá para cada etapa de vida de la especie sensible, tanto para velocidad como para profundidad.

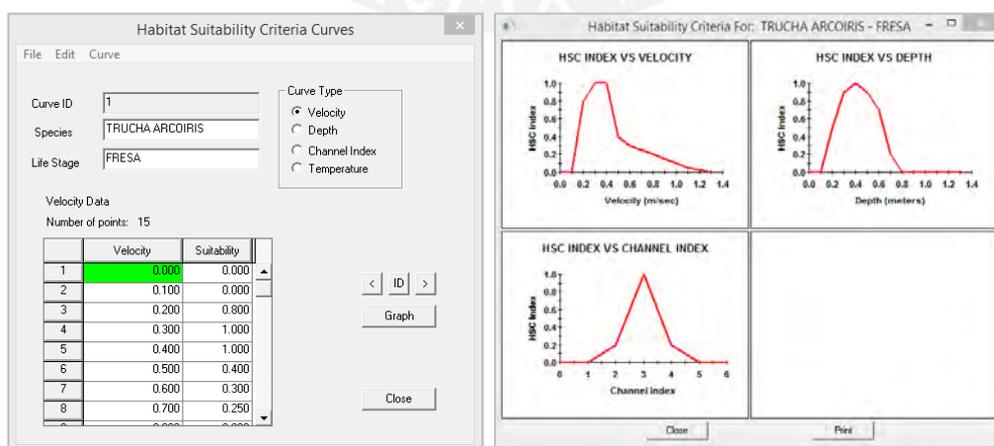


Figura 30. Pestaña Habitat Suitability Criteria curves del programa PHABSIM.

4.2.2. EJECUCIÓN DEL MODELO

Luego de ingresar la información recolectada en la visita a campo y procesada mediante el software HEC-RAS, se procede a realizar la ejecución del modelo, la cual consiste en simular las condiciones hidráulicas y ecológicas que se presentan para todos los caudales ingresados. Para el primero, el modelo requiere modelar dos características: nivel de agua y velocidad. Para el segundo, el software presenta tres módulos para realizar una simulación de hábitat. Cabe resaltar que los resultados de las simulaciones realizadas con PHABSIM deben ser validadas.

Simulación hidráulica

Las técnicas utilizadas para simular las condiciones de agua deben ser escogidas de manera correcta, ya que su efecto en la relación caudal versus hábitat será significativo. Además, se debe tener en consideración que los programas de simulación hidráulica utilizados por el software PHABSIM asumen que la topografía de la superficie del canal no varía de manera significativa para los valores de caudal de agua asignados para la calibración. Esta asunción puede no cumplirse y de ser este el caso, deberá analizarse de manera independiente cada caso. En la presente investigación, como se explicó con anterioridad, solo se presentó un viaje al campo para la obtención de uno de los caudales de calibración, por lo que se asume que no se cuentan con variaciones. Las características hidráulicas que se simulan para un río son la elevación del nivel de agua y la velocidad, en ese orden.

Para la presente investigación, se realizó un análisis de máximas avenidas para un periodo de retorno de 50 años, mediante el método estadístico de Gumbel. Para ello, se utilizó el registro histórico de caudales con 48 años de data otorgado por la Junta de Usuarios de Chiclayo. A partir de este, se obtuvo un caudal máximo de $65 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual se seleccionó como uno de los caudales de simulación en el software PHABSIM. Asimismo, la lista de flujos seleccionados para simularse en la presente investigación son los siguientes: 0.5, 1, 3, 5, 15, 20, 25, 50, 65 y $85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Modelación del nivel de superficie

El programa PHABSIM incluye tres aproximaciones para obtener las elevaciones del nivel de agua: relación etapa-descarga (STGQ, Stage-Discharge relationship), ecuación de Manning's (MANSQ, Manning's Equation) y Perfil de nivel de agua (The water Surface profile). En este

caso, se utilizó el primer método, el cual se encuentra por defecto, y permite que se analice cada sección transversal de manera independiente de las otras y que se estime la elevación del nivel de agua para todos los flujos de interés mediante el uso de una ecuación de regresión obtenida de la relación entre las etapas-descarga ingresadas.

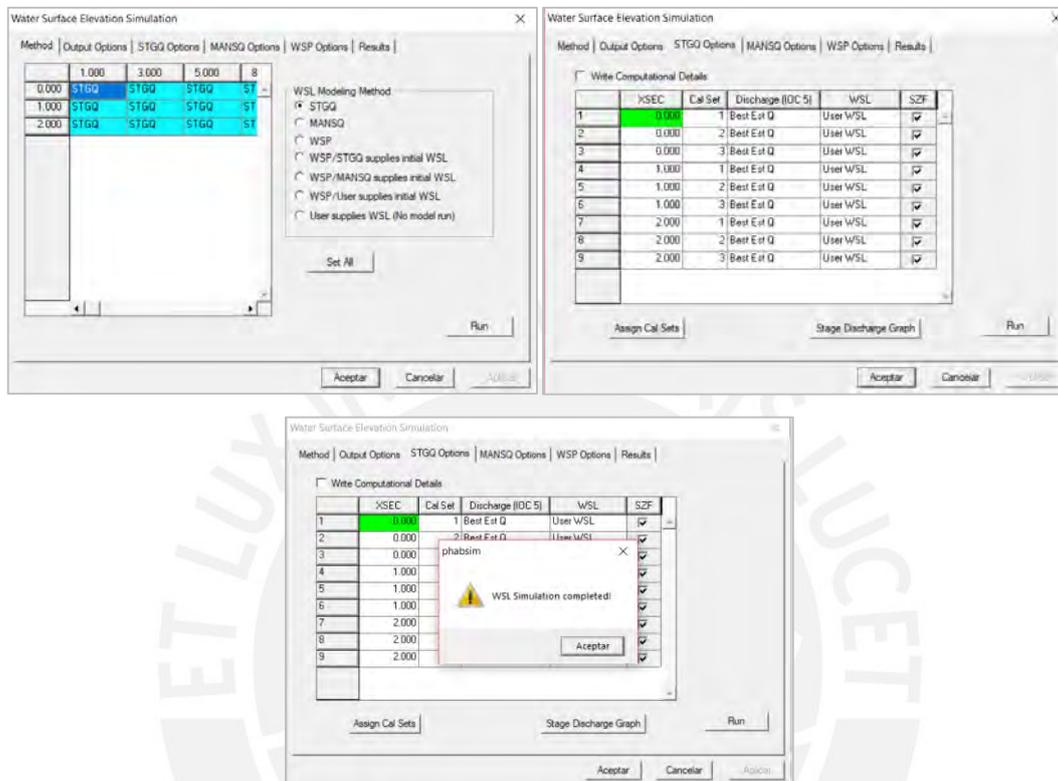


Figura 31. Asignación y corrida del modelo STGQ

Modelación de Velocidad

De igual manera, a partir de las configuraciones de velocidad ingresadas durante el procedimiento de calibración, se puede obtener el comportamiento de esta característica hidráulica para los caudales que se está simulando. Se puede observar que este es correcto, ya que las zonas del canal que poseen una mayor profundidad y, por ende, una columna de agua mayor, experimentarán velocidades mayores. A continuación, se presenta la pestaña principal del módulo de simulación de velocidad.

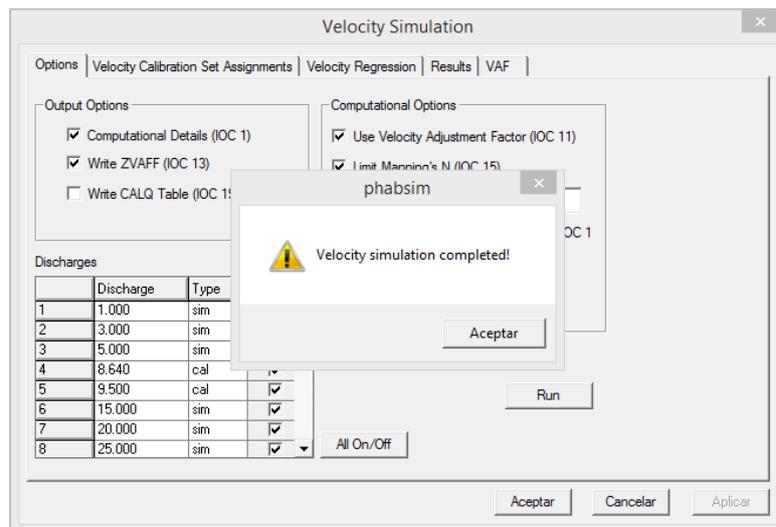


Figura 32. Ventana de Velocity Simulación

El módulo permite obtener una distribución de velocidad en función de un caudal previamente ingresado para cada una de las secciones a analizar. Adicionalmente, se debe verificar que no existan datos incongruentes como, por ejemplo, velocidades donde no se presente un flujo de agua o saltos atípicos.

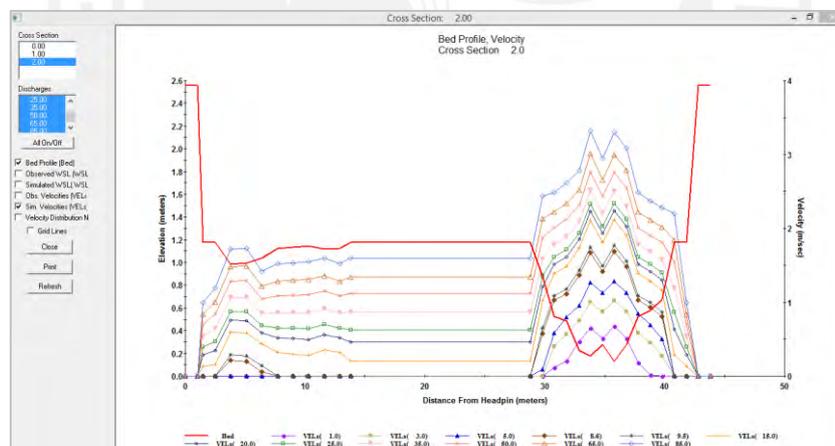


Figura 33. Esquema de velocidades simuladas en la sección 1.00 para $Q=8,64\text{m}^3/\text{s}$

Simulación de hábitat

La simulación de hábitat utiliza la información ingresada de la especie sensible (curvas de preferencia), la estructura del canal y la modelación del nivel de agua y velocidad, para transformarlas en un índice de cantidad y calidad de hábitat disponible, la cual es denominada área útil ponderada o WUA por sus siglas en inglés, y es calculada para cada celda de cada sección en cada flujo simulado. Esta se realiza para cada etapa considerada de la especie de

análisis. Asimismo, la simulación de hábitat presenta tres módulos para su ejecución, Habtae, Habtam y Habef. Para esta investigación se empleará el primer módulo, el cual permite obtener una superficie útil para una especie en cada una de las secciones a analizar para un rango determinado de caudales. Este valor se obtiene mediante la correlación de curvas de preferencias de la especie y las características de una celda en la sección. Con todas las correlaciones para cada caudal en conjunto con un grupo de caudales, se construye la curva de superficie ponderada útil que relaciona el caudal circulante con la superficie ponderada útil o WUA. A continuación, se presenta la pestaña principal del módulo Habtae seguido de los resultados obtenidos en el programa. Se debe verificar que en la pestaña Life Stages, se encuentre seleccionado los datos de la especie a estudiar.

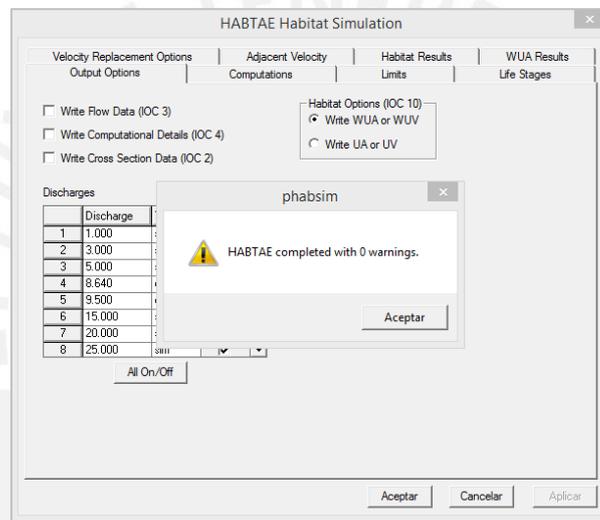


Figura 34. Ventana Habtae con mensaje de simulación completa

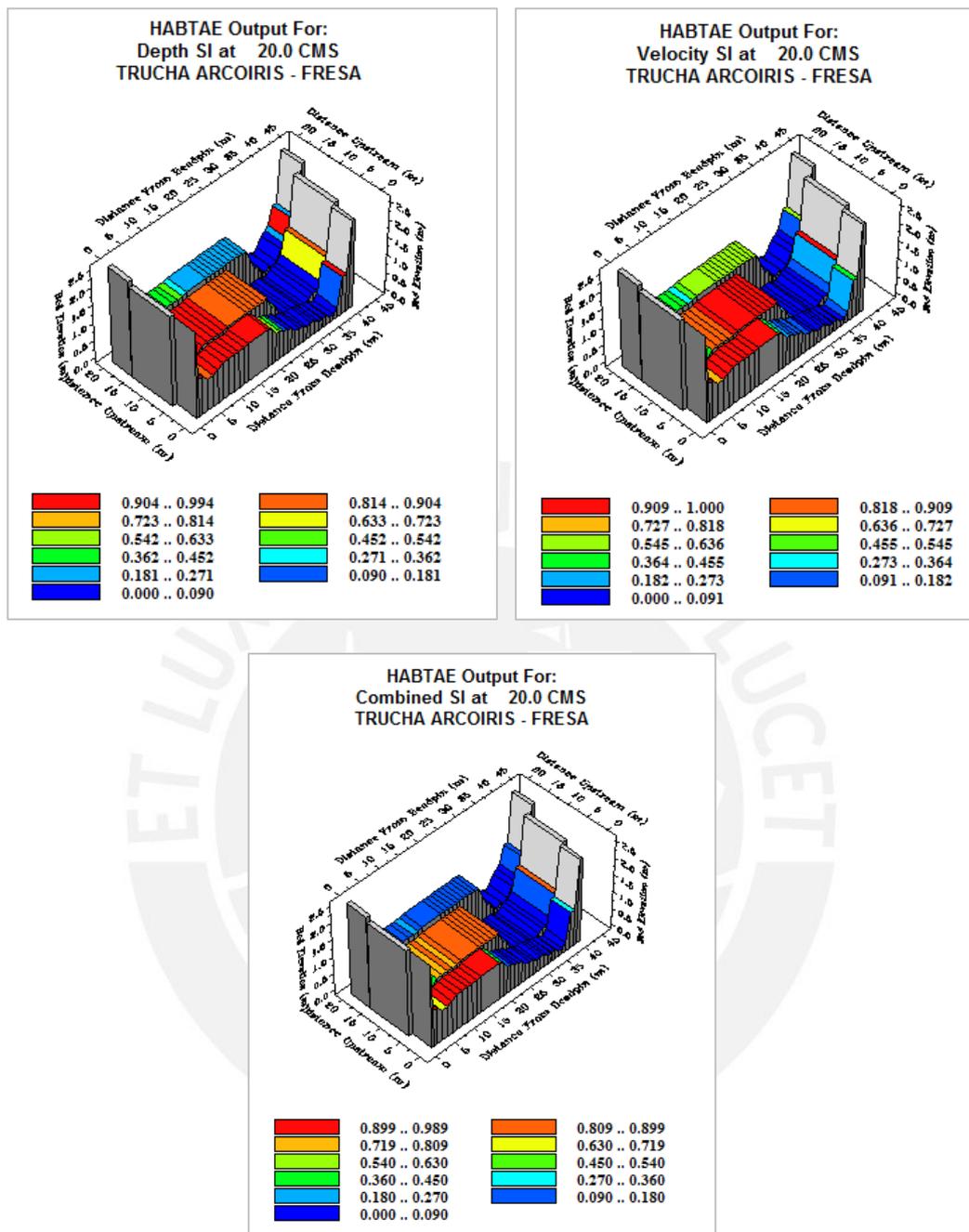


Figura 35. Preferencias de la especie sensible según características del río (área, profundidad, velocidad e índice de canal)

De esta manera, variando el caudal circulante y los estadios de la especie estudiada, se puede obtener la curva de superficie ponderada útil (WUA). A continuación, se presenta la curva en mención para cada uno de los cuatro estadios mencionados.

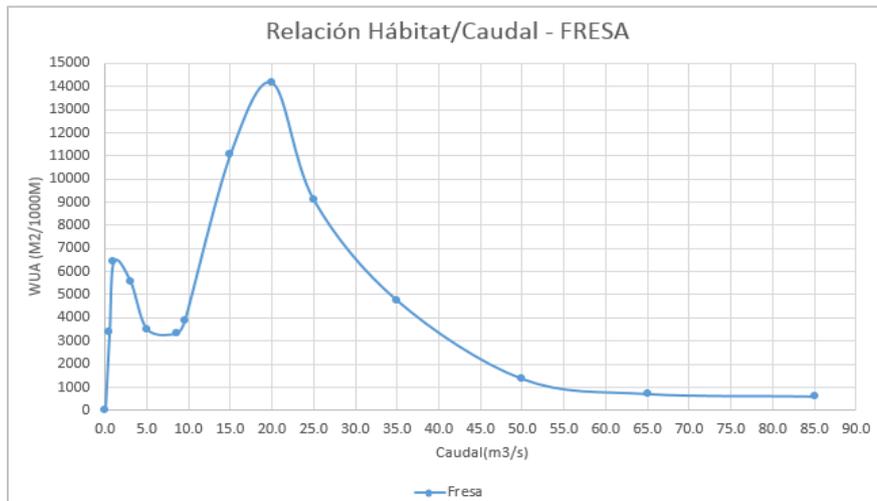


Figura 36. Imagen de la WUA para la trucha en estado Fresa

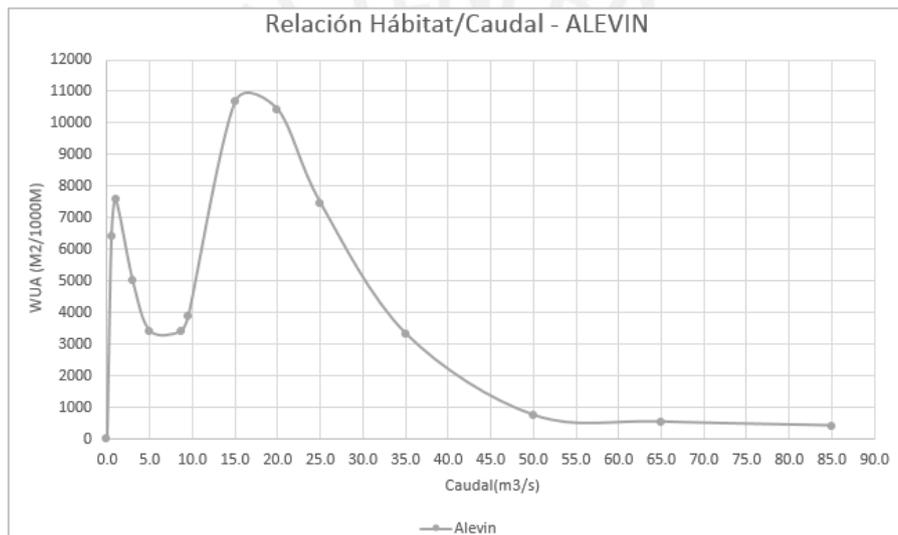


Figura 37. Gráfico del WUA para la trucha en estado Alevín

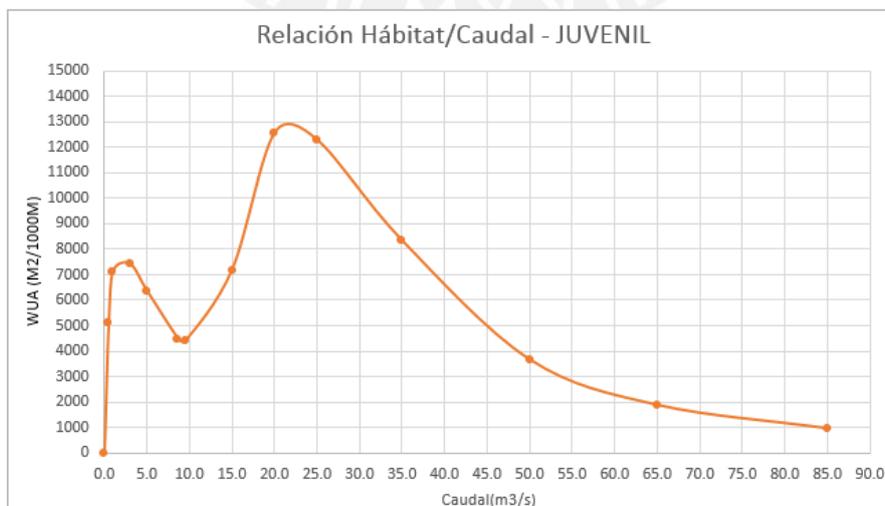


Figura 38. Gráfico del WUA para la trucha en estado Juvenil

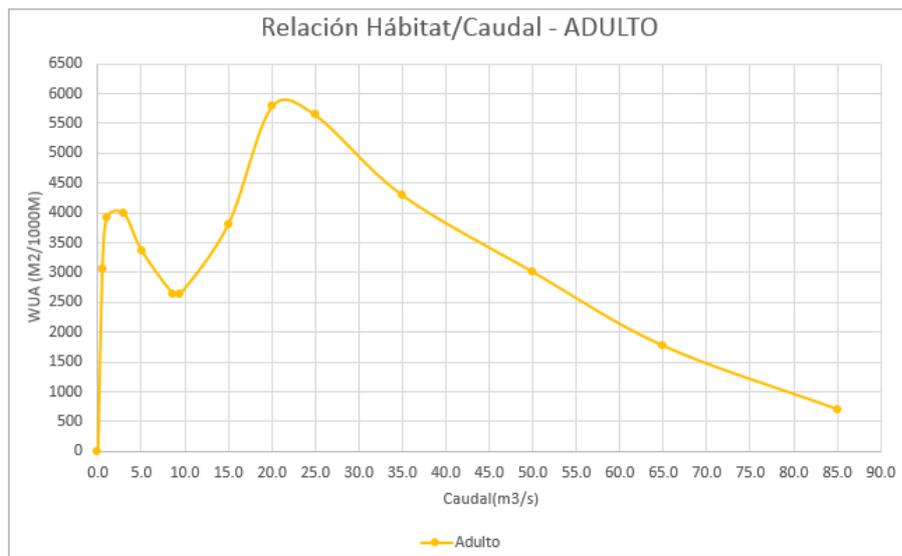


Figura 39. Gráfico del WUA para la trucha en estado Adulto



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS HIDROLÓGICOS

La mayoría de los métodos hidrológicos procesan un histórico de caudal y estiman un valor de caudal ecológico constante durante todos los meses del año, a pesar de que el régimen de un río es variable durante las estaciones. En la presente investigación, se utilizó un método que determina tres valores de caudales ecológicos que representan tres periodos del año (New England Aquatic Base Flow), tres métodos que consideraban un único valor de diseño (90% de Excedencia, Caudal Medio Mensual, y Método de Rafael Heras) y otro dos métodos que generan caudales ecológicos que varían para cada mes. (Método de Tennan Recomendable y Método de Tennan Excelente). A continuación, se presenta una tabla resumen que contiene todos los flujos ecológicos obtenidos.

Tabla 18.

Cuadro resumen de los resultados de caudal ecológico para cada método

Método Hidrológicos/ Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
New England Aquatic Base Flow	55.2	55.2	46.6	46.6	46.6	7.2	7.2	7.2	7.2	55.2	55.2	55.2
Método 90% de Excedencia	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Método Caudal Medio Mensual	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
Método de Rafael Heras	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Método de Tennan (Recomendable)	10.9	17.6	25.7	22.7	13.4	6.7	4.0	2.6	2.9	5.6	7.4	8.5
Método de Tennan (Excelente)	21.8	35.2	51.3	45.5	26.8	13.5	8.0	5.2	5.8	11.2	14.8	17.1

De la tabla anterior, se aprecia valores de caudales ecológicos que se encuentran en un rango bastante amplio, ya que van desde $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $55.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Por un lado, se puede visualizar que el primer método presenta valores de caudal ecológico considerablemente mayores que los siguientes cinco en los meses de mayor flujo; es decir, desde setiembre hasta mayo. Por otro lado, se observa que el método de Rafael Heras recomienda el menor valor de flujo ecológico y lo representa constante en todo un año, lo cual no simula correctamente el comportamiento variable del río. Para tener una mejor idea del orden de magnitud de los resultados, se procedió a determinar el porcentaje que cada método constituye respecto al caudal medio mensual. Para ello, se elaboró la siguiente tabla que recopila los valores de caudal medio mensual obtenidos del histórico de caudal de 48 años y los porcentajes en mención.

Tabla 19.**Porcentaje del caudal ecológico respecto al caudal medio mensual**

Caudal/Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Qm(Caudal medio mensual)	36.28	58.62	85.55	75.80	44.74	22.47	13.33	8.64	9.74	18.67	24.64	28.48
New England Aquatic Base Flow	152.1	94.1	54.5	61.5	104.2	32.1	54.2	83.6	74.1	295.6	223.9	193.8
90% de Excedencia	19.3	11.9	8.2	9.2	15.6	31.2	52.5	81.1	71.8	37.5	28.4	24.6
Caudales Medios Mensuales	23.5	14.6	10.0	11.3	19.1	38.0	64.1	98.9	87.6	45.7	34.7	30.0
Método de Rafael Heras	1.6	1.0	0.7	0.8	1.3	2.6	4.4	6.7	6.0	3.1	2.4	2.0
Método de Tennan (Recomendable)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Método de Tennan (Excelente)	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0

De la Tabla 19, se extrae que el rango de porcentajes de caudal ecológico obtenidos respecto al caudal medio mensual va de 3.4% hasta 295.6%. Por un lado, el método de New England Aquatic Base Flow genera resultados que triplican el valor del caudal medio mensual. Por otro lado, el método de Rafael Heras estima un flujo mínimo que puede llegar a representar solo el 3.4% (mes de marzo).

Asimismo, a partir de la curva de duración elaborada para el método de 90% de persistencia, se calculó el porcentaje que representaría cada uno de los valores obtenidos con los métodos de enfoque hidrológico para visualizar qué porcentaje del tiempo, el río cumpliría con estos flujos mínimos.

Tabla 20.**Porcentaje correspondiente a la curva de duración**

Método Hidrológicos/ Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
New England Aquatic Base Flow	20.6	20.6	26.7	26.7	26.7	87.3	87.3	87.3	87.3	20.6	20.6	20.6
90% de Excedencia	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
Caudal Medio Mensual	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9
Método de Rafael Heras	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Método de Tennan (Recomendable)	78.2	63.9	50.1	54.7	72.4	88.6	96.2	100.0	99.3	91.7	86.8	83.9
Método de Tennan (Excelente)	56.4	37.7	23.2	27.6	48.4	72.3	85.3	92.8	91.0	77.4	69.5	64.9

De la tabla 20, se puede apreciar que la mayoría de los resultados presentan valores que serán excedidos o igualados más del 50% del tiempo. Entre ellos, se aprecia que el caudal ecológico estimado por método de Rafael Heras se encuentra presente el 99.4% del tiempo y el método de Tennan Recomendable determina un flujo ecológico para el mes de agosto que se cumplirá el 100% del tiempo. Esto se debe a que son valores muy cercanos o menores al caudal mínimo mensual que se presentan en el registro histórico de 48 años. Asimismo, se incluyeron en el análisis métodos que arrojaron resultados con un porcentaje de excedencia menores al 50%. Por ejemplo, el método de New England Aquatic Base Flow estimó un caudal que se cumple el 20.6% del tiempo para el periodo que involucra los meses de octubre a febrero.

A partir de las tablas presentas, en las que comparamos el porcentaje que representa el caudal ecológico respecto caudal medio mensual y su persistencia, se observa que, en el tramo de análisis del río Chancay-Lambayeque, la aplicación del método New England Aquatic Base Flow como caudal ecológico no sería viable para un proyecto de aprovechamiento hídrico debido a que presenta valores de caudal ecológico casi tres veces superiores al régimen natural del río con porcentajes de persistencia del 20%.

Por último, se puede visualizar que el valor de caudal ecológico, que se obtiene para un río, es variable dentro un rango bastante amplio, según el método que se designe. Asimismo, se debe tener en cuenta que, como se dijo en la sección de Revisión de la Literatura, los métodos que pertenecen al enfoque hidrológico determinan valores que se utilizarán de manera referencial y deben de validarse mediante controles debido a que estos responden a ríos con parámetros regionales que no necesariamente se replicarán en el río de análisis.

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ECOHIDRAULICOS

Como se explicó anteriormente, el programa funciona a partir de modulos que se van ejecutando y que permiten obtener un resultado que integren a todas las variables analizadas e ingresadas. Por ello, se debe de verificar los resultados parciales de cada modelo de manera que se tenga la seguridad de que la información recolectada es coherente.

En primer lugar, se analizan los resultados de los niveles de superficie de agua para cada caudal de interés y para cada una de las secciones ingresadas, los cuales deben variar proporcionalmente. Como se aprecia en la siguiente imagen, el nivel de agua se incrementa para caudales mayores.

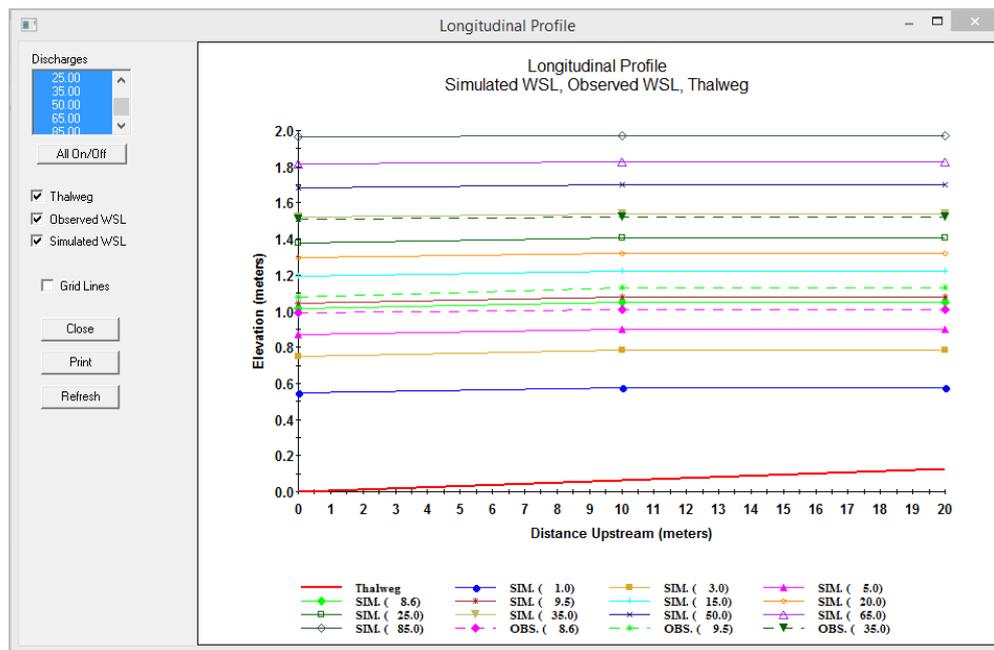


Figura 40. Nivel de agua (WSL) observado y simulado para caudales de interés en la sección más aguas abajo.

Asimismo, en un corte longitudinal, se puede verificar que el nivel del agua no decae porque esto indicaría que el flujo va en contra de la pendiente. Por ello, el resultado obtenido es correcto, ya que la sección a una distancia cero se encuentra más aguas abajo y la sección a una separación de 20 m, más aguas arriba. De esta manera, se comprueba que el flujo es correcto.

Adicionalmente, las velocidades obtenidas deben ser proporcionales al caudal simulado; es decir, no deben ocurrir incongruencias como presentar velocidades de mayores magnitudes para caudales pequeños respecto a las velocidades obtenidas para caudales mayores.

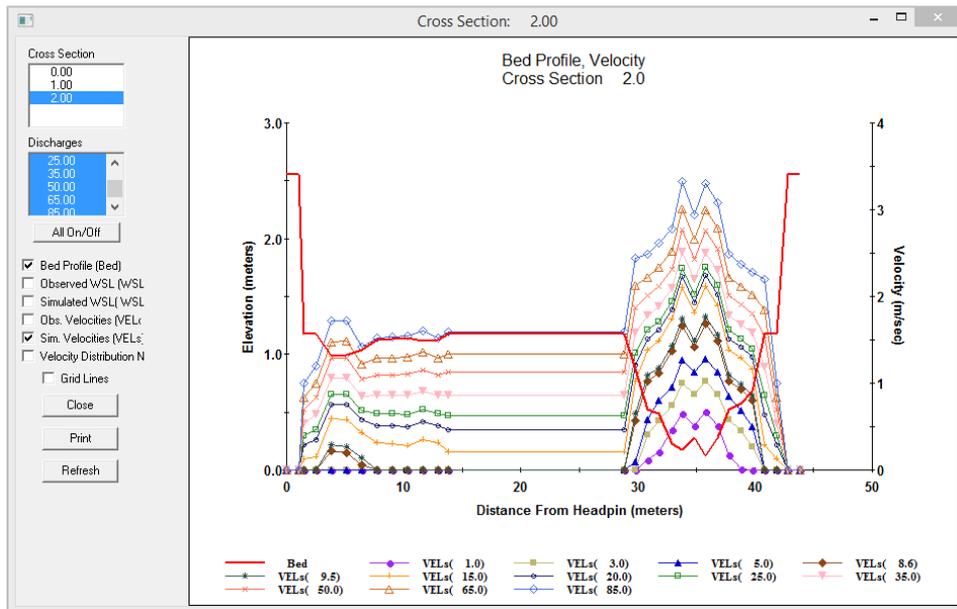


Figura 41. Distribución de velocidades de los caudales simulados en la sección 2 del río

La determinación de la superficie ponderada útil (WUA) se obtuvo a partir de las curvas de preferencia de la especie y las gráficas de simulación mostradas anteriormente. Para un caudal específico, la sección se dividió en celdas. Cada celda presentará características de profundidad y velocidad asociadas al caudal simulado y serán calificadas por un coeficiente que se obtendrá a partir de correlacionar estas con las curvas de preferencia. Luego, estos coeficientes se multiplicarán y se obtendrá un coeficiente global C_i . Para finalizar, se realizará una sumatoria de cada C_i por el área de la celda respectiva analizada en la sección y se obtendrá un punto de la gráfica.

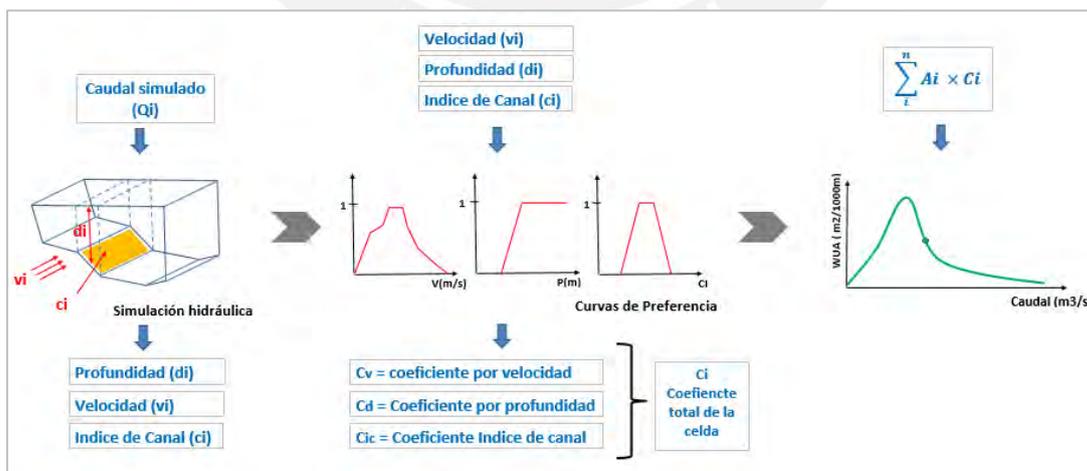


Figura 42. Esquema del proceso para obtener las gráficas WUA

Al realizar este proceso para diferentes caudales, se obtuvieron las curvas de superficie ponderada útil, las cuales se muestran en la imagen a continuación.

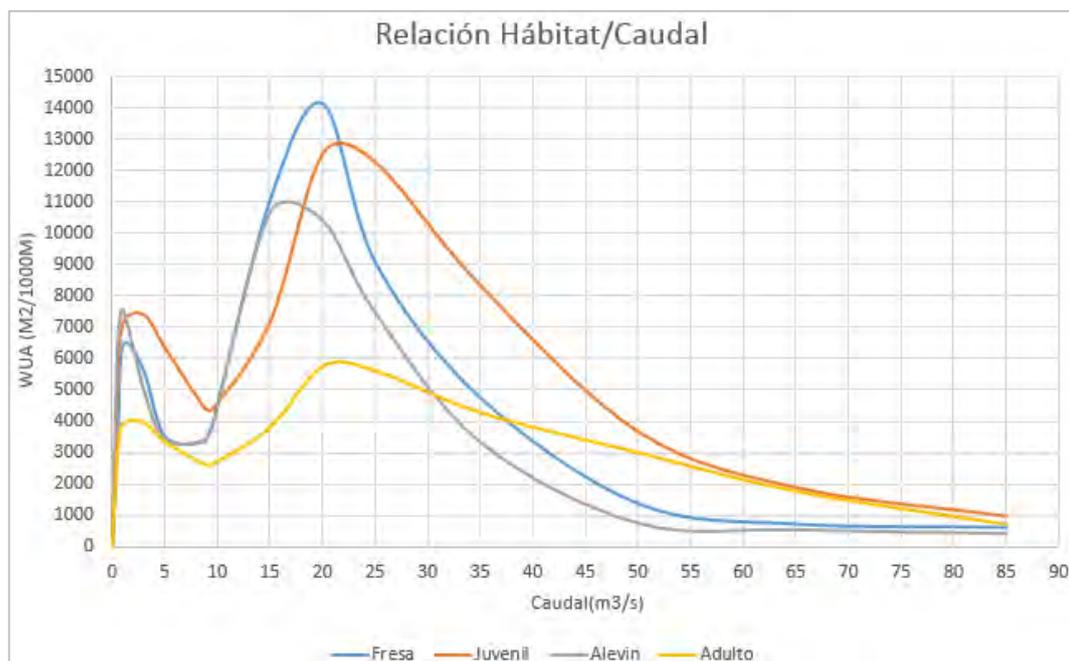


Figura 43. Superficie Ponderada Útil para todos los estadios de vida de la trucha

Las curvas obtenidas para la especie sensible en su etapa freza, alevín, juvenil y adulto son similares en tendencia, ya que todas presentan tres puntos importantes en su distribución: dos puntos de inflexión superior y uno inferior. Asimismo, para caudales muy elevados la tendencia es asintótica hacia el valor cero. Sin embargo, el nivel de habitabilidad alcanzado o el caudal en el cual se genera cada uno de estos puntos varía dependiendo del estadio. En la siguiente tabla se detallan tres puntos mencionados anteriormente, así como su caudal asociado.

Tabla 21.

Puntos importantes de las curvas WUA obtenidas

Condición		Fresa	Juvenil	Alevín	Adulto
Punto de inflexión 1	WUA	6500.0	7500.0	7550.0	4050.0
	Q (m3/s)	1.5	3.0	1.0	2.0
Punto de inflexión 2	WUA	3250.0	4300.0	3250.0	2600.0
	Q (m3/s)	7.0	9.5	6.5	9.0
Punto de inflexión 3	WUA	14200.0	12800.0	10800.0	5900.0
	Q (m3/s)	20.0	21.0	16.0	21.0

Es necesario indicar que, los puntos de inflexión superiores indican que se están presentando condiciones favorables para el desarrollo de la especie de análisis. El primero se obtiene cuando el nivel del agua se encuentra en la parte más profunda de la sección (Caso 1) y se generan circunstancias que benefician la supervivencia y evolución de la especie. El segundo se da cuando el tirante del agua se incrementa hasta alcanzar el que se muestra en el caso 2. Aquí, se

forman un escenario propicio en la zona de la izquierda-central y al presentar un área mucho mayor respecto al primer caso, se obtiene un valor de habitabilidad más alto.



Figura 44. Esquema de los casos

Con lo explicado anteriormente, se generó una serie de caudales ecológicos para los dos casos. Se seleccionó como caudal ecológico mínimo a cada uno de los dos puntos de inflexión superiores y se elaboraron regímenes de caudales ecológicos para su análisis.

El caudal ecológico mínimo es aquel que estará presente en el mes de mayor estiaje, el cual, para la presente investigación, se presenta en agosto. Además, mediante coeficientes de proporción entre los caudales medios mensuales y el flujo seleccionado, se obtiene un régimen de caudales ecológicos (RCE) que reproduzca el régimen natural del río Chancay – Lambayeque en el tramo de análisis. Al exhibir valores distintos para cada estadio de la especie, se debe seleccionar cuál de estas etapas se desea priorizar y verificar que el flujo elegido genere valores habitabilidad no muy alejados a máximos para los otros. Esto se realiza para los dos valores de pico elegidos, los cuales corresponden a la etapa freza o desove de la especie. Los valores obtenidos para los meses del año se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 22.

Régimen de caudales ecológicos

Caudal	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	octubre	noviembre	diciembre
CE1	6.30	10.18	14.86	13.16	7.77	3.90	2.31	1.50	1.69	3.24	4.28	4.95
CE 2	84.02	135.75	198.11	175.52	103.60	52.04	30.86	20.00	22.57	43.24	57.07	65.96

Asimismo, para una mejor visualización del comportamiento de los regímenes presentados con los caudales ecológicos mínimos obtenidos, se elabora el siguiente gráfico.

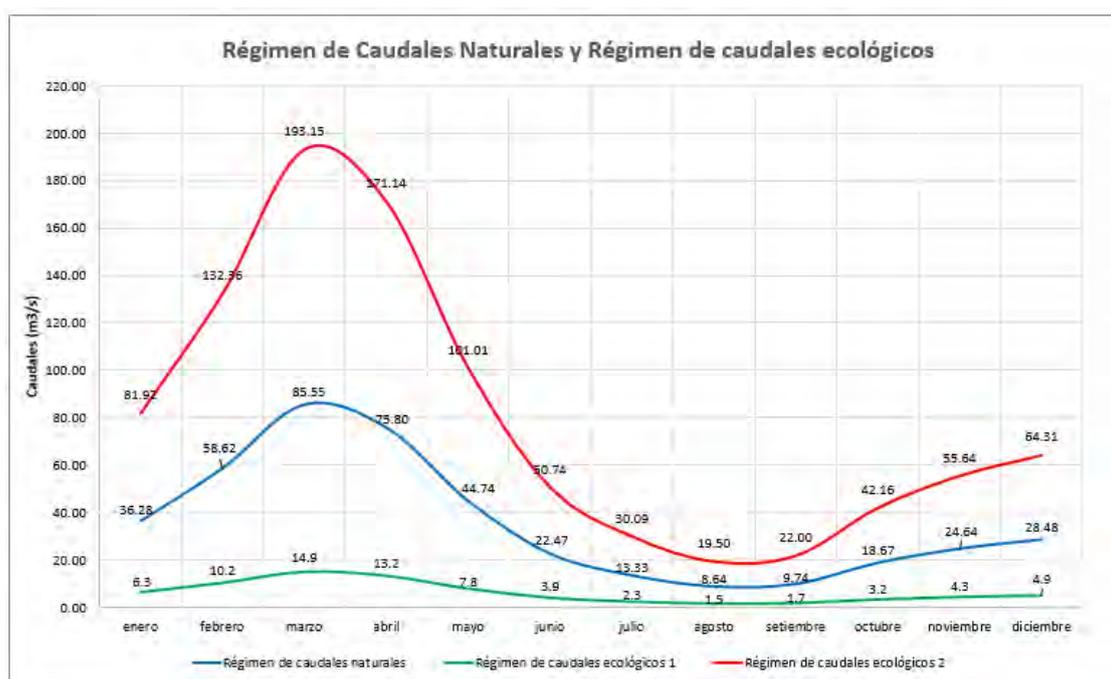


Figura 45. Régimen de caudales naturales y Régimen de caudales ecológicos para los dos picos seleccionados ($1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $19.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Como se aprecia en el gráfico anterior, por un lado, al seleccionar un caudal en el rango de $[1.0; 3.0] \text{ m}^3/\text{s}$, el RCE generado resulta una fracción menor a la unidad del régimen de caudales medios, por lo que es una elección viable para proyectos que requieran destinar un porcentaje del caudal para otros fines. Por otro lado, cuando se elabora la curva de RCE para un caudal en el rango de $[16.0; 21.0] \text{ m}^3/\text{s}$, al ser este mayor al flujo medio del mes más crítico, el coeficiente de proporción resulta por encima de la unidad y la serie que se forma no es factible. Esto debido a que no se pueden presentar flujos con valores más altos que los naturales en el río. Asimismo, el caudal ecológico que se obtiene para el mes de mayor avenida es de aproximadamente $190.0 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo este inadecuado, de ser posible, para la especie sensible, ya que el área ponderada útil provista para flujos en el orden de los $70.0 \text{ m}^3/\text{s}$ es escasa para la supervivencia de la misma. Cabe resaltar que, el gráfico se realizó con los caudales picos que generan una mayor habitabilidad a la etapa freza de la especie sensible.

5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación se detallan los métodos hidrológicos y eco hidráulicos se puede observar que algunos de los métodos como Tennan Recomendable, Tennan Excelente, IFIM-PHABSIM primer pico presentan valores de caudal ecológico variables en el año. Por otro lado los métodos de Rafael Heras, 90% de excedencia y caudal medio mensual optan por definir un único valor

para todos los meses. Es necesario aclarar que no se consideraron los métodos descritos como inviables en los anteriores subcapítulos lo cual se verificará con un análisis estadístico.

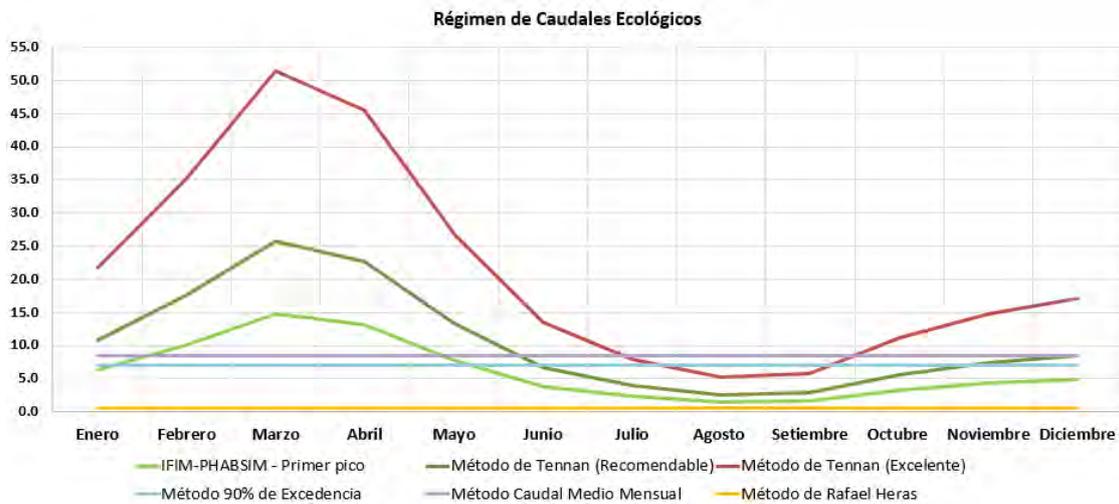


Figura 46. Gráfico comparativo de los resultados obtenidos

A manera de corroborar la inviabilidad mencionada anteriormente de las metodologías para determinar el caudal ecológico, se realiza una comparación de medias con un análisis de varianza ANOVA mediante el software SPSS, en donde se considera como parámetro de control al caudal medio mensual natural del río. De esta, se obtiene como grupo de metodologías factibles a aquellas cuyas medias se encuentran presentadas en la siguiente tabla, tanto para las pruebas de Student-Newman-Keuls (S-N-K) y HSD Tukey. Cabe mencionar que los valores de significancia obtenidos para el grupo obtenido de cada uno de los métodos son de 0.268 y 0.442, siendo estos mayores a 0.05. Esto quiere decir que las metodologías que se encuentran en el grupo se pueden comparar entre ellas.

Tabla 23.

Grupo de metodologías comparables por S-N-K y HSD Tukey

Métodos	Student-Newman-Keuls	HSD Tukey
Método de Rafael Heras		
IFIM - PHABSIM - Primer pico	6.18	6.18
Método 90% Excedencia	7.00	7.00
Método Caudal Medio Mensual	8.54	8.54
Método de Tennan (Recomendado)	10.67	10.67
Método de Tennan (Excelente)	21.34	21.34
New England Aquatic Base Flow		
IFIM - PHABSIM - Segundo pico		

Con las metodologías agrupadas obtenidas, se procede a realizar una comparación entre los enfoques hidrológicos y eco hidráulico para verificar que la estimación del caudal ecológico

por cada uno de estos presenta resultados distintos. Para ello, se procede a promediar los valores obtenidos por mes. La significancia obtenida resulta 0.013, que es menor a 0.05 y, por lo tanto, comprueba lo mencionado anteriormente. En caso, se hubiera presentado una significancia mayor a 0.05 este análisis indicaría que no existe diferencia en obtener los resultados por un enfoque u otro.

Tabla 24.

Análisis descriptivo del enfoque hidrológico y eco-hidráulico

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Enfoque hidrológico	12	11,8900	5,77357	1,66669	8,2216	15,5584	5,83	23,13
Enfoque ecohidráulico	12	6,2200	4,46156	1,28794	3,3853	9,0547	1,50	14,86
Total	24	9,0550	5,81800	1,18759	6,5983	11,5117	1,50	23,13

Por último, se realiza un análisis de varianza de un factor entre las metodologías de enfoque hidrológico y eco-hidráulico que no estiman un valor constante para todos los meses del año y el régimen de caudales mínimos naturales del río, como tratamiento control, para determinar qué métodos son apropiados en comparación. De esta manera, de las pruebas t de Dunnett, se obtiene que los resultados presentados por los métodos IFIM-PHABSIM para el primer pico y Tennan (Recomendable) se adecuan mejor al régimen del caudal mínimo del río debido a que exhiben valores de significancia cercanos a la unidad. Asimismo, se reafirma que el RCE elaborado a partir del segundo pico y el método de New England Aquatic Base Flow muestran valores más alejados y, por ende, no son adecuados.

Tabla 25.

Análisis T Dunnett para los métodos

	(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
T de Dunnett (bilateral) ^b	New England Aquatic Base Flow	Q _{mín} (Caudal mínimo mensual)	27,98333	11,04852	,056	-,4769	56,4436
	Método de Tennan (Recomendable)	Q _{mín} (Caudal mínimo mensual)	1,59333	11,04852	1,000	-26,8669	30,0536
	Método de Tennan (Excelente)	Q _{mín} (Caudal mínimo mensual)	12,26667	11,04852	,699	-16,1936	40,7269
	IFIM-PHABSIM - Primer pico	Q _{mín} (Caudal mínimo mensual)	-2,90000	11,04852	,999	-31,3602	25,5602
	IFIM-PHABSIM - Segundo pico	Q _{mín} (Caudal mínimo mensual)	73,31417*	11,04852	,000	44,8539	101,7744

6. CONCLUSIONES

- Las metodologías que pertenecen al enfoque hidrológico estiman valores de caudal ecológico mediante variables hidrológicas. Con uso del método New England Aquatic Base Flow, se estimaron valores de caudal ecológico de 55.19, 46.60 y 7.22 m³/s, de los cuales los dos primeros representan un porcentaje mayor a la unidad respecto al caudal medio anual del río Chancay. Esto se debe a que el método divide el año en tres periodos y utiliza la mediana del mes recomendado por el mismo para cada uno de estos. Por ello, esta metodología tiene como resultados valores más exigentes y que son poco probable que se utilicen en un proyecto hidráulico, donde lo que se espera es aprovechar el mayor porcentaje de flujo posible. Del método de 90% de excedencia, se puede concluir que el caudal ecológico estimado representa un valor crítico que será excedido o igualado el 90% del tiempo; es decir, que se evidenciarán en los años más secos, siendo este menor que el caudal mínimo medio mensual. Para el método de Rafael Heras, se obtuvo un caudal, cuyo valor $Q_{\text{ecológico}} = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es menor que caudal mínimo medio mensual ($Q_{\text{mín}} = 8.54 \text{ m}^3/\text{s}$). Asimismo, al igual que el método anterior, este flujo se presenta en los años más secos, siendo su porcentaje de persistencia aproximadamente de 99.4%, lo cual evidencia que este solo será menor en casos extremos. Por último, el método de Tennan, a diferencia de las otras metodologías analizadas en la presente investigación, determina un valor de caudal para cada mes del año, lo que busca adecuarse al régimen variable del río. Las condiciones de flujo seleccionadas otorgaron dos rangos de valores de [2.59; 25.66] m³/s y [5.18; 51.33] m³/s, para los casos de recomendado y excelente, respectivamente. Esto se debe a que el método selecciona un porcentaje en base a la calidad de hábitat que se busca preservar. De lo descrito anteriormente, se puede concluir que los valores de flujo obtenidos por metodologías de enfoque hidrológico son muy variables para un mismo histórico de caudales perteneciente a un río, por lo que estandarizar una metodología o un pequeño grupo de estas para el análisis del caudal ecológico necesario en obras hidráulicas, reduciría la variabilidad del mismo.

- De las gráficas WUA vs Caudal obtenidas del modelamiento en el software PHABSIM, se concluye que los picos de mayor habitabilidad se presentan en los rangos de valores entre $[1.0; 3.0] \text{ m}^3/\text{s}$ y $[16.0; 21.0] \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, seleccionar un único valor de caudal para todo el año modificaría las componentes del régimen natural del río, lo que genera una degradación en los ecosistemas dependientes. Por ello se selecciona el caudal ecológico mínimo igual a $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes más crítico y, a partir de este, se genera una curva de régimen de caudales ecológicos que se adapte al flujo natural del río. Este valor produce una habitabilidad de 54% para el mes de mayor estiaje. Asimismo, cabe resaltar que el caudal elegido representa al primer pico de habitabilidad de la etapa freza de la especie sensible, ya que, para la presente investigación, se priorizó sus necesidades de desove para asegurar su preservación en el tramo de análisis.
- Se observó que, para los métodos hidrológicos, el rango de valores de caudal ecológico para un mismo histórico de caudales es bastante amplio y la obtención de estos se realiza mediante procedimientos simplistas como son seleccionar un único porcentaje respecto a los caudales medios o un porcentaje de persistencia de una curva de duración. Asimismo, si bien estas metodologías son de fácil aplicación y costo reducido, la mayoría de estas estiman un único valor, el cual se extrapola para todos los meses del año, lo que no se adapta al régimen variable del río. En cambio, la metodología eco-hidráulica incluye en su cálculo factores que representan las necesidades de las especies existentes en el ecosistema analizado. Por ello, este último determina un valor de caudal ecológico mínimo que permite que los seres vivos que dependen de este flujo no sean afectados negativamente en el mes más crítico. Además, el generar un régimen de caudales ecológicos permite evaluar valores que se adaptan al régimen natural de flujos de un río y asegurar una habitabilidad adecuada para la especie sensible. Por último, del análisis de varianza de un factor, se determina que las metodologías de NEABF, Rafael Heras y los resultados del segundo pico de IFIM-PHABSIM no son adecuados y que los regímenes que más se adecuan al de los caudales mínimos del río de análisis son los obtenidos por el método de Tennan (Recomendable) y por IFIM-PHABSIM (primer pico).

Recomendaciones

- Las metodologías hidrológicas estiman valores de caudal ecológico con amplios rangos de variación. Además, aquellas que fijan un único valor durante todo el año no representan al régimen natural de un río, debido a que no integran la variabilidad hidrológica de estos. Por ello, estas metodologías solo deben ser utilizadas como valores referenciales que deberán ser corroborados mediante monitoreos que permitan verificar que no se presente una degradación de las condiciones ambientales del río.
- Se recomienda elaborar los estudios en campo necesarios para obtener información más precisa de la especie sensible y la morfología del río y, de esta manera, poder obtener el cálculo del caudal ecológico mediante la aplicación la metodología IFIM PHABSIM. Asimismo, se sugiere el uso de instrumentación más precisa para la obtención de los datos hidráulicos, como correntómetros para la medición de velocidad del agua. Por último, se recomienda que el estudio del cual se obtienen las curvas de preferencia de la especie escogida haya sido desarrollado en el lugar de aplicación de este método.
- Se recomienda realizar un análisis de la influencia del fenómeno del niño en el cálculo del caudal ecológico, ya que este evento genera picos de caudales atípicos dentro del histórico de caudales. Asimismo, se resalta la importancia del monitoreo del caudal ecológico en las diversas cuencas del país para asegurar una respuesta positiva de los organismos dependientes. Por último, se sugiere la inclusión de las variables sociales y económicas en la determinación de un caudal ecológico adecuado para los ríos de las diversas cuencas del Perú.

7.REFERENCIAS

- Aguilera, G., & Pouilly, M. (2012). Caudal ecológico : definiciones , metodologías , adaptacion a la Andina. *Acta Zoológica Lilloana*, 56(1–2), 15–30.
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Diagnostico sobre los caudales ecológicos en el Perú. Autoridad Nacional del Agua.*
- Autoridad nacional del Agua. (2013). *Plan de Gestión de Recursos Hídricos Cuenca CHANCAY-LAMBAYEQUE.*
- Autoridad Nacional del Agua (2010). Tratamiento del cauce de un río para el control de inundaciones en la cuenca Chancay Lambayeque
- Barrera, J. (2018). *Estimación de caudal ambiental mediante enfoques ecosistémicos para ña cuenca del río Nare en el departamento de Antioquia, enmarcada en la metodología ELOHA.* Universidad Nacional de Colombia.
- Brown Manrique, Oscar, Gallardo Ballat, Yurisbel, Williams Harriote, Patricio W., & Torres Martínez, Yuneisi. (2016). *Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila. Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 58-71. Recuperado en 24 de junio de 2020, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000100005&lng=es&tln g=es.
- Castro, L. M., Carvajal, Y., & Monsalve, E. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Revista Ingeniería e Investigación*, 10(2), 179–195.
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICAN S.A.
- Chávez Céspedes, C., & Lara Camarena, S. (2019). Revisión de la literatura y planteamiento del caudal ecológico en el río Chancay-Lambayeque con uso de métodos de enfoque hidrológico y eco-hidráulico. Recuperado de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14761>
- Corporación Autonoma Regional del Quindío. (2011). *Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos en la UMC río Quindío. Convenio Interadministrativo N° 027.* Armenia. <https://doi.org/10.1001/jama.1969.03150170082024>
- Diez-hernández, J. M. (2008). Evaluación de requerimientos ecológicos para el diseño de regímenes ambientales de caudales fluviales. *Revista de Ingeniería*, 28, 15–23.

- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). *Caudal, Elementos esenciales de caudales ambientales*. (M. Dyson, G. Bergkamp, & J. Scanlon, Eds.), UICN (Vol. 136). Gland: UICN.
- El Comercio. (2014). La trucha, el pez que fue traído al Perú y criado por mineros. Recuperado 16 febrero, 2019, de <https://elcomercio.pe/economia/negocios/trucha-pezu-traido-peru-criado-mineros-358791>
- El Economista (2015). Establecen veda reproductiva para trucha arco iris en región Cusco. Recuperado 16 febrero, 2019, de <https://www.economistaamerica.pe/mercados-eAm-peru/noticias/6932338/08/15/Establecen-veda-reproductiva-para-trucha-arco-iris-en-region-Cusco.html>
- FAO. (2009). *Oncorhynchus mykiss*. Recuperado 17 febrero, 2019, de http://www.fao.org/tempref/FI/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_rainbowtrout.htm
- Flachier, A. L. (2016). *Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos. Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Gallo-vélez, D. (2016). CONSIDERATIONS REGARDING THE APPLICATION OF R2CROSS HYDRAULIC, *II*(45), 111–126.
- García, A. (2013). DEFINICIÓN Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS DEL RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES PARA LA CLASIFICACIÓN DE RÍOS EN HIDRORREGIONES. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Gestión. (2018). Producción nacional de trucha creció 678 % en 10 años. Recuperado 16 febrero, 2019, de <https://gestion.pe/economia/produccion-nacional-trucha-crecio-678-10-anos-234898>
- Guevara, E. (2013). Evolución histórica de la Legislación Hídrica en el Perú. *Círculo de Derecho Administrativo*, 319–334.
- Instituto del Mar del Perú IMARPE (2013). Camarón del río. Consultado en: http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I013101020201000000000
- King, J., & Louw, D. (1998). Instream flow assessments for regulated rivers in south africa using the building block methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, *1*(2), 109–124. <https://doi.org/10.1080/14634989808656909>
- Ley N°29338 (Ley de Recursos Hídricos). Diario El Peruano, Lima, Perú, 31 de marzo del 2009.

-
- Ley N°17752 (Ley General de Aguas). Diario El Peruano, Lima, Perú, Julio de 1969.
- Ley N°20017. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 16 de junio del 2005.
- Diez Hernandez, M. (2010). Software Phabsim 1.20 Guía de Usuario. III Curso Internacional Modelación Caudales Ecológicos. Clayton, Panamá.
- Minagri (2015). *Manual N°5 Medición del Agua*. Lima, Perú
- Ministerio de Agricultura y Minas (2010) . Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos N°29338. Lima, Peru
- Morales, O. F. (2017). *Evaluación de la metodología IFIM-PHABSIM para la determinación de caudales ambientales en un tramo de la sub-cuenca río Neusa*. Universidad Santo Tomás, Bogotá. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02280.x>
- Moscoso, S. B. (2012). *Modelamiento de caudal ecológico con el método ifim - phabsim para el rio Salcca*. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Mayo Rustarazo, M. (2000). *Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos: Adaptación del método IFIM- PHABSIM a los ríos españoles*. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Observatorio de la cuenca Chancay-Lambayeque (2007). Caracterización Biofísica. Consultado en: http://190.119.239.199/chancay/caracterizacion_biofisica.html
- Ordoñez-Gálvez, J. J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. Retrieved from http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo_Hidrologico.pdf
- Pact Perú. (2013). *PLAN DE SENSIBILIZACIÓN DE LA CUENCA CHANCAY 2013 - 2015*. Lambayeque.
- Parker, G. W., Armstrong, D. S., & Richards, T. A. (2004). *Comparison of Methods for Determining Streamflow Requirements for Aquatic Habitat Protection at Selected Sites on the Assabet and Charles Rivers, Eastern Massachusetts*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.1007/BF01309689>
- Pierre, J. (2002). *River Mechanics*. Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Poff, N. & Allan, J. David & Bain, Mark & Karr, James & Prestegard, Karen & Richter, Brian & Sparks, Richard & Stromberg, Juliet. (1997). The Natural Flow Regime: A Paradigm for River Conservation and Restoration. *Bioscience*. 47.

Quevedo, R. (2017). *Estudio de las Características de Hábitat Asociadas a la Presencia de Cryphiops caementarius (Camarón de río) en el río Ocoña , y medidas para conservar este recurso.* Universidad Nacional de San Agustín.

Resolución Jefatural N°117 - 2015 ANA. Diario El Peruano, Lima, Perú, 08 de mayo del 2015.

Resolución Jefatural N°154 - 2016 ANA. Diario El Peruano, Lima, Perú, 17 de junio del 2016.

Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish , Wildlife , Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 37–41. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006)

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5–6), 397–441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>

U.S. Geological Survey (2001). Phabsim for Windows

Ven Te Chow. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa fé, Bogotá: Mc Graw Hill.

Villanueva, J., & Alata, J. (2011). *Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico*. Universidad nacional de ingeniería.

Villon, M. (2002). *HIDROLOGÍA*. (E. Villon, Ed.) (Segunda Ed). Cartago, Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

ANEXOS



Anexo 1. Registro histórico de Caudales

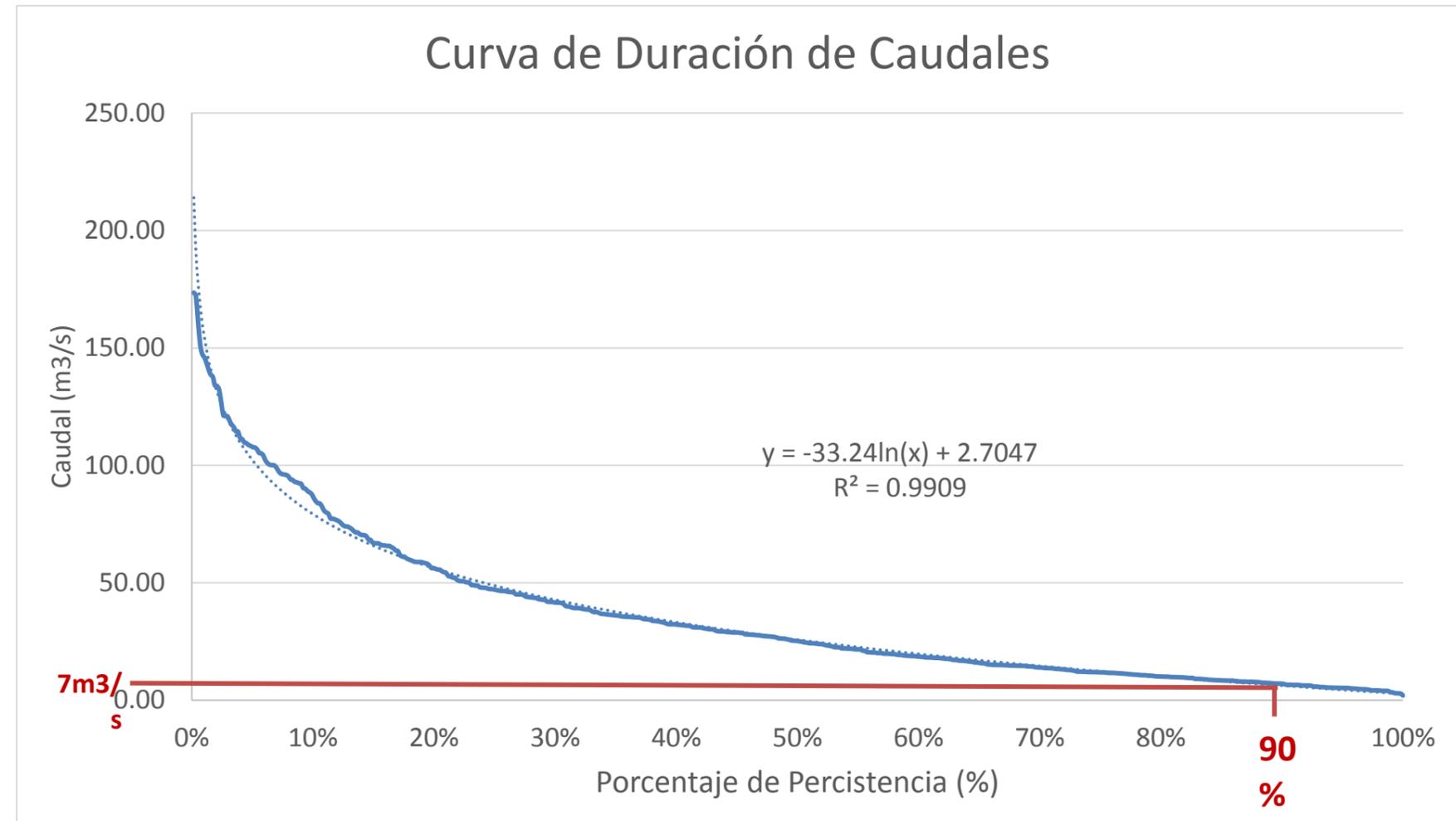
Id	Campaña	agosto	setiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	anual	Caracterizacion
1	1969 - 1970	8.11	7.83	14.72	33.13	56.27	45.02	26.72	47.34	50.18	74.01	27.20	13.97	33.71	normal
2	1970-1971	8.39	12.02	38.90	39.71	58.61	51.36	64.64	172.09	102.19	46.56	32.34	20.09	53.91	humedo
3	1971-1972	21.03	19.63	46.91	41.81	44.63	46.12	36.38	143.72	84.71	41.71	25.29	15.20	47.26	humedo
4	1972-1973	11.23	9.80	17.18	18.22	26.28	29.11	30.19	63.72	132.20	54.90	32.10	30.96	37.99	normal
5	1973-1974	18.83	23.35	16.43	45.17	31.91	45.94	71.42	58.32	50.70	32.33	24.41	16.77	36.30	normal
6	1974-1975	13.68	20.42	45.99	32.34	34.40	61.19	92.35	173.54	120.85	60.00	33.56	22.50	59.23	humedo
7	1975-1976	19.73	29.66	43.56	41.97	41.88	46.21	42.97	70.62	92.16	52.18	29.00	24.20	44.51	humedo
8	1976-1977	15.01	14.40	13.90	9.92	8.39	30.39	100.06	90.06	67.08	38.71	23.82	13.81	35.46	normal
9	1977-1978	8.56	8.48	10.61	27.74	32.36	13.08	15.76	27.91	41.56	47.12	19.66	11.63	22.04	seco
10	1978-1979	7.38	9.73	8.15	17.68	19.45	27.61	24.26	111.14	46.53	36.76	18.19	12.16	28.25	seco
11	1979-1980	9.06	18.03	8.46	6.22	5.20	5.60	13.95	24.10	28.64	14.76	10.68	8.31	12.75	seco
12	1980-1981	3.37	2.97	8.52	35.41	35.62	28.66	89.12	104.21	121.01	61.86	38.08	27.23	46.34	humedo
13	1981-1982	17.11	21.09	22.52	27.69	32.51	22.55	39.24	30.71	52.70	42.72	23.18	13.17	28.77	seco
14	1982-1983	7.32	10.62	40.01	36.27	77.30	75.36	43.71	138.65	100.05	72.94	31.75	14.10	54.01	humedo
15	1983-1984	7.91	12.95	12.87	10.01	30.97	16.54	117.28	118.94	71.38	65.69	29.01	26.23	43.31	humedo
16	1984-1985	11.84	14.29	43.45	21.88	24.27	14.64	18.05	25.77	20.36	14.64	8.90	5.28	18.61	seco
17	1985-1986	6.49	7.94	18.88	7.44	15.82	32.90	42.71	29.30	93.72	47.80	17.39	11.61	27.67	seco
18	1986-1987	11.49	7.61	13.65	35.55	30.26	80.62	70.29	39.23	31.03	27.32	11.62	9.02	30.64	normal
19	1987-1988	12.80	11.95	15.06	19.84	13.35	34.87	66.70	35.31	54.49	37.56	20.06	10.57	27.71	seco
20	1988-1989	7.91	9.08	16.83	33.76	17.09	66.08	105.35	92.77	97.92	30.55	15.66	9.10	41.84	humedo
21	1989-1990	5.51	10.14	36.48	19.01	10.10	7.16	27.03	21.92	35.75	28.79	28.84	13.26	20.33	seco
22	1990-1991	6.98	4.97	25.03	29.26	34.56	13.52	26.12	82.35	57.36	47.28	13.32	7.96	29.06	seco
23	1991-1992	5.28	3.97	5.22	8.64	12.18	25.22	14.97	35.24	60.47	33.34	19.28	8.65	19.37	seco
24	1992-1993	5.19	8.32	16.71	11.98	7.85	12.15	63.52	126.96	116.28	58.87	25.46	12.12	38.78	normal
25	1993-1994	7.07	7.83	27.12	47.43	17.91	66.78	79.97	95.86	68.24	37.42	19.17	10.04	40.40	normal
26	1994-1995	5.68	3.97	4.72	29.41	31.95	14.75	49.07	43.79	50.39	24.96	12.11	7.29	23.17	seco
27	1995-1996	4.09	4.87	13.70	39.25	39.98	47.87	72.08	96.71	73.98	33.81	17.65	5.77	37.48	normal
28	1996-1997	4.17	5.02	23.01	22.08	6.22	5.31	56.25	31.64	31.71	17.56	9.47	4.69	18.10	seco
29	1997-1998	2.73	1.99	3.99	18.16	45.02	58.83	96.27	134.05	145.95	79.34	23.99	10.89	51.77	humedo
30	1998-1999	6.55	7.03	10.10	19.30	7.79	18.39	105.12	83.92	87.79	65.13	48.07	35.48	41.22	normal
31	1999-2000	10.78	15.05	29.29	12.64	36.07	8.87	45.04	108.64	88.51	77.36	36.57	17.85	40.56	normal
32	2000-2001	11.98	11.64	11.39	5.36	35.27	55.92	41.33	137.73	96.08	46.71	25.36	13.61	41.03	normal
33	2001-2002	6.51	15.97	11.19	28.83	33.64	21.63	50.88	106.85	100.98	35.48	18.60	11.04	36.80	normal
34	2002-2003	4.66	3.90	14.61	38.64	50.03	28.02	59.68	41.57	58.83	35.17	23.91	11.47	30.87	normal
35	2003-2004	5.59	5.78	7.07	15.38	19.80	23.54	15.15	27.99	34.48	30.15	11.86	9.85	17.22	seco
36	2004-2005	11.87	4.65	16.83	47.97	43.96	20.29	39.40	114.47	55.56	18.55	8.78	6.26	32.38	normal
37	2005-2006	3.35	3.04	24.64	18.80	16.40	28.82	77.00	151.52	83.69	21.68	19.82	10.02	38.23	normal
38	2006-2007	6.46	5.23	4.92	14.96	38.55	42.97	28.10	76.19	95.27	52.22	15.00	10.40	32.52	normal
39	2007-2008	6.39	4.54	14.86	44.03	18.08	52.87	114.36	109.45	111.61	55.62	24.58	11.97	47.36	humedo
40	2008-2009	9.67	14.71	41.46	18.22	18.96	65.86	107.61	140.80	68.46	49.01	27.87	14.43	48.09	humedo
41	2009-2010	8.32	6.24	9.61	21.74	36.17	22.74	61.15	69.80	90.41	50.69	18.47	10.86	33.85	normal

42	2010-2011	5.94	7.73	7.44	6.69	9.47	26.34	59.30	35.96	109.73	34.29	12.47	10.20	27.13	seco
43	2011-2012	5.36	6.24	11.02	9.81	36.73	107.73	147.37	108.31	99.38	58.11	20.48	11.33	51.82	humedo
44	2012-2013	5.37	4.18	11.91	32.12	22.07	46.50	54.13	133.83	76.61	70.33	40.80	14.61	42.70	humedo
45	2013-2014	9.48	5.24	16.08	9.85	22.08	21.62	37.52	100.30	39.04	66.00	18.75	10.44	29.70	normal
46	2014-2015	7.12	9.74	14.86	20.09	31.12	65.70	48.79	121.31	92.93	48.80	27.45	11.75	41.64	humedo
47	2015-2016	6.56	4.15	7.72	26.90	20.28	21.96	66.87	86.15	73.51	26.00	16.12	8.31	30.38	normal
48	2016-2017	4.20	4.38	6.47	2.92	10.35	37.00	58.95	161.40	94.00	74.48	30.97	14.35	41.62	humedo



ANEXO 2. Método 90% de Persistencia

Porcentaje de Persistencia	Caudal (m3/s)	Orden
0.17%	173.54	1
0.35%	172.09	2
0.52%	161.40	3
0.69%	151.52	4
0.87%	147.37	5
1.04%	145.95	6
1.22%	143.72	7
1.39%	140.80	8
1.56%	138.65	9
1.74%	137.73	10
1.91%	134.05	11
2.08%	133.83	12
2.26%	132.20	13
2.43%	126.96	14
2.60%	121.31	15
2.78%	121.01	16
2.95%	120.85	17
3.13%	118.94	18
3.30%	117.28	19
3.47%	116.28	20
3.65%	114.47	21
3.82%	114.36	22
3.99%	111.61	23
4.17%	111.14	24
4.34%	109.73	25
4.51%	109.45	26
4.69%	108.64	27
4.86%	108.31	28
5.03%	107.73	29
5.21%	107.61	30
5.38%	106.85	31
5.56%	105.35	32
5.73%	105.12	33
5.90%	104.21	34
6.08%	102.19	35
6.25%	100.98	36
6.42%	100.30	37
6.60%	100.06	38
6.77%	100.05	39
6.94%	99.38	40
7.12%	97.92	41
7.29%	96.71	42



16.15%	65.70	93
16.32%	65.69	94
16.49%	65.13	95
16.67%	64.64	96
16.84%	63.72	97
17.01%	63.52	98
17.19%	61.86	99
17.36%	61.19	100
17.53%	61.15	101
17.71%	60.47	102
17.88%	60.00	103
18.06%	59.68	104
18.23%	59.30	105
18.40%	58.95	106
18.58%	58.87	107
18.75%	58.83	108
18.92%	58.83	109
19.10%	58.61	110
19.27%	58.32	111
19.44%	58.11	112
19.62%	57.36	113
19.79%	56.27	114
19.97%	56.25	115
20.14%	55.92	116
20.31%	55.62	117
20.49%	55.56	118
20.66%	54.90	119
20.83%	54.49	120
21.01%	54.13	121
21.18%	52.87	122
21.35%	52.70	123
21.53%	52.22	124
21.70%	52.18	125
21.88%	51.36	126
22.05%	50.88	127
22.22%	50.70	128
22.40%	50.69	129
22.57%	50.39	130
22.74%	50.18	131
22.92%	50.03	132
23.09%	49.07	133
23.26%	49.01	134
23.44%	48.80	135
23.61%	48.79	136
23.78%	48.07	137
23.96%	47.97	138
24.13%	47.87	139
24.31%	47.80	140
24.48%	47.43	141
24.65%	47.34	142



24.83%	47.28	143
25.00%	47.12	144
25.17%	46.91	145
25.35%	46.71	146
25.52%	46.56	147
25.69%	46.53	148
25.87%	46.50	149
26.04%	46.21	150
26.22%	46.12	151
26.39%	45.99	152
26.56%	45.94	153
26.74%	45.17	154
26.91%	45.04	155
27.08%	45.02	156
27.26%	45.02	157
27.43%	44.63	158
27.60%	44.03	159
27.78%	43.96	160
27.95%	43.79	161
28.13%	43.71	162
28.30%	43.56	163
28.47%	43.45	164
28.65%	42.97	165
28.82%	42.97	166
28.99%	42.72	167
29.17%	42.71	168
29.34%	41.97	169
29.51%	41.88	170
29.69%	41.81	171
29.86%	41.71	172
30.03%	41.57	173
30.21%	41.56	174
30.38%	41.46	175
30.56%	41.33	176
30.73%	40.80	177
30.90%	40.01	178
31.08%	39.98	179
31.25%	39.71	180
31.42%	39.40	181
31.60%	39.25	182
31.77%	39.24	183
31.94%	39.23	184
32.12%	39.04	185
32.29%	38.90	186
32.47%	38.71	187
32.64%	38.64	188
32.81%	38.55	189
32.99%	38.08	190
33.16%	37.56	191
33.33%	37.52	192



33.51%	37.42	193
33.68%	37.00	194
33.85%	36.76	195
34.03%	36.73	196
34.20%	36.57	197
34.38%	36.48	198
34.55%	36.38	199
34.72%	36.27	200
34.90%	36.17	201
35.07%	36.07	202
35.24%	35.96	203
35.42%	35.75	204
35.59%	35.62	205
35.76%	35.55	206
35.94%	35.48	207
36.11%	35.48	208
36.28%	35.41	209
36.46%	35.31	210
36.63%	35.27	211
36.81%	35.24	212
36.98%	35.17	213
37.15%	34.87	214
37.33%	34.56	215
37.50%	34.48	216
37.67%	34.40	217
37.85%	34.29	218
38.02%	33.81	219
38.19%	33.76	220
38.37%	33.64	221
38.54%	33.56	222
38.72%	33.34	223
38.89%	33.13	224
39.06%	32.90	225
39.24%	32.51	226
39.41%	32.36	227
39.58%	32.34	228
39.76%	32.34	229
39.93%	32.33	230
40.10%	32.12	231
40.28%	32.10	232
40.45%	31.95	233
40.63%	31.91	234
40.80%	31.75	235
40.97%	31.71	236
41.15%	31.64	237
41.32%	31.12	238
41.49%	31.03	239
41.67%	30.97	240
41.84%	30.97	241
42.01%	30.96	242



42.19%	30.71	243
42.36%	30.55	244
42.53%	30.39	245
42.71%	30.26	246
42.88%	30.19	247
43.06%	30.15	248
43.23%	29.66	249
43.40%	29.41	250
43.58%	29.30	251
43.75%	29.29	252
43.92%	29.26	253
44.10%	29.11	254
44.27%	29.01	255
44.44%	29.00	256
44.62%	28.84	257
44.79%	28.83	258
44.97%	28.82	259
45.14%	28.79	260
45.31%	28.66	261
45.49%	28.64	262
45.66%	28.10	263
45.83%	28.02	264
46.01%	27.99	265
46.18%	27.91	266
46.35%	27.87	267
46.53%	27.74	268
46.70%	27.69	269
46.88%	27.61	270
47.05%	27.45	271
47.22%	27.32	272
47.40%	27.23	273
47.57%	27.20	274
47.74%	27.12	275
47.92%	27.03	276
48.09%	26.90	277
48.26%	26.72	278
48.44%	26.34	279
48.61%	26.28	280
48.78%	26.23	281
48.96%	26.12	282
49.13%	26.00	283
49.31%	25.77	284
49.48%	25.46	285
49.65%	25.36	286
49.83%	25.29	287
50.00%	25.22	288
50.17%	25.03	289
50.35%	24.96	290
50.52%	24.64	291
50.69%	24.58	292



50.87%	24.41	293
51.04%	24.27	294
51.22%	24.26	295
51.39%	24.20	296
51.56%	24.10	297
51.74%	23.99	298
51.91%	23.91	299
52.08%	23.82	300
52.26%	23.54	301
52.43%	23.35	302
52.60%	23.18	303
52.78%	23.01	304
52.95%	22.74	305
53.13%	22.55	306
53.30%	22.52	307
53.47%	22.50	308
53.65%	22.08	309
53.82%	22.08	310
53.99%	22.07	311
54.17%	21.96	312
54.34%	21.92	313
54.51%	21.88	314
54.69%	21.74	315
54.86%	21.68	316
55.03%	21.63	317
55.21%	21.62	318
55.38%	21.09	319
55.56%	21.03	320
55.73%	20.48	321
55.90%	20.42	322
56.08%	20.36	323
56.25%	20.29	324
56.42%	20.28	325
56.60%	20.09	326
56.77%	20.09	327
56.94%	20.06	328
57.12%	19.84	329
57.29%	19.82	330
57.47%	19.80	331
57.64%	19.73	332
57.81%	19.66	333
57.99%	19.63	334
58.16%	19.45	335
58.33%	19.30	336
58.51%	19.28	337
58.68%	19.17	338
58.85%	19.01	339
59.03%	18.96	340
59.20%	18.88	341
59.38%	18.83	342



59.55%	18.80	343
59.72%	18.75	344
59.90%	18.60	345
60.07%	18.55	346
60.24%	18.47	347
60.42%	18.39	348
60.59%	18.22	349
60.76%	18.22	350
60.94%	18.19	351
61.11%	18.16	352
61.28%	18.08	353
61.46%	18.05	354
61.63%	18.03	355
61.81%	17.91	356
61.98%	17.85	357
62.15%	17.68	358
62.33%	17.65	359
62.50%	17.56	360
62.67%	17.39	361
62.85%	17.18	362
63.02%	17.11	363
63.19%	17.09	364
63.37%	16.83	365
63.54%	16.83	366
63.72%	16.77	367
63.89%	16.71	368
64.06%	16.54	369
64.24%	16.43	370
64.41%	16.40	371
64.58%	16.12	372
64.76%	16.08	373
64.93%	15.97	374
65.10%	15.82	375
65.28%	15.76	376
65.45%	15.66	377
65.63%	15.38	378
65.80%	15.20	379
65.97%	15.15	380
66.15%	15.06	381
66.32%	15.05	382
66.49%	15.01	383
66.67%	15.00	384
66.84%	14.97	385
67.01%	14.96	386
67.19%	14.86	387
67.36%	14.86	388
67.53%	14.76	389
67.71%	14.75	390
67.88%	14.72	391
68.06%	14.71	392



68.23%	14.64	393
68.40%	14.64	394
68.58%	14.61	395
68.75%	14.61	396
68.92%	14.43	397
69.10%	14.40	398
69.27%	14.35	399
69.44%	14.29	400
69.62%	14.10	401
69.79%	13.97	402
69.97%	13.95	403
70.14%	13.90	404
70.31%	13.81	405
70.49%	13.70	406
70.66%	13.68	407
70.83%	13.65	408
71.01%	13.61	409
71.18%	13.52	410
71.35%	13.35	411
71.53%	13.32	412
71.70%	13.26	413
71.88%	13.17	414
72.05%	13.08	415
72.22%	12.95	416
72.40%	12.87	417
72.57%	12.80	418
72.74%	12.64	419
72.92%	12.47	420
73.09%	12.18	421
73.26%	12.16	422
73.44%	12.15	423
73.61%	12.12	424
73.78%	12.11	425
73.96%	12.02	426
74.13%	11.98	427
74.31%	11.98	428
74.48%	11.97	429
74.65%	11.95	430
74.83%	11.91	431
75.00%	11.87	432
75.17%	11.86	433
75.35%	11.84	434
75.52%	11.75	435
75.69%	11.64	436
75.87%	11.63	437
76.04%	11.62	438
76.22%	11.61	439
76.39%	11.49	440
76.56%	11.47	441
76.74%	11.39	442



76.91%	11.33	443
77.08%	11.23	444
77.26%	11.19	445
77.43%	11.04	446
77.60%	11.02	447
77.78%	10.89	448
77.95%	10.86	449
78.13%	10.78	450
78.30%	10.68	451
78.47%	10.62	452
78.65%	10.61	453
78.82%	10.57	454
78.99%	10.44	455
79.17%	10.40	456
79.34%	10.35	457
79.51%	10.20	458
79.69%	10.14	459
79.86%	10.10	460
80.03%	10.10	461
80.21%	10.04	462
80.38%	10.02	463
80.56%	10.01	464
80.73%	9.92	465
80.90%	9.85	466
81.08%	9.85	467
81.25%	9.81	468
81.42%	9.80	469
81.60%	9.74	470
81.77%	9.73	471
81.94%	9.67	472
82.12%	9.61	473
82.29%	9.48	474
82.47%	9.47	475
82.64%	9.47	476
82.81%	9.10	477
82.99%	9.08	478
83.16%	9.06	479
83.33%	9.02	480
83.51%	8.90	481
83.68%	8.87	482
83.85%	8.78	483
84.03%	8.65	484
84.20%	8.64	485
84.38%	8.56	486
84.55%	8.52	487
84.72%	8.48	488
84.90%	8.46	489
85.07%	8.39	490
85.24%	8.39	491
85.42%	8.32	492



85.59%	8.32	493
85.76%	8.31	494
85.94%	8.31	495
86.11%	8.15	496
86.28%	8.11	497
86.46%	7.96	498
86.63%	7.94	499
86.81%	7.91	500
86.98%	7.91	501
87.15%	7.85	502
87.33%	7.83	503
87.50%	7.83	504
87.67%	7.79	505
87.85%	7.73	506
88.02%	7.72	507
88.19%	7.61	508
88.37%	7.44	509
88.54%	7.44	510
88.72%	7.38	511
88.89%	7.32	512
89.06%	7.29	513
89.24%	7.16	514
89.41%	7.12	515
89.58%	7.07	516
89.76%	7.07	517
89.93%	7.03	518
90.10%	6.98	519
90.28%	6.69	520
90.45%	6.56	521
90.63%	6.55	522
90.80%	6.51	523
90.97%	6.49	524
91.15%	6.47	525
91.32%	6.46	526
91.49%	6.39	527
91.67%	6.26	528
91.84%	6.24	529
92.01%	6.24	530
92.19%	6.22	531
92.36%	6.22	532
92.53%	5.94	533
92.71%	5.78	534
92.88%	5.77	535
93.06%	5.68	536
93.23%	5.60	537
93.40%	5.59	538
93.58%	5.51	539
93.75%	5.37	540
93.92%	5.36	541
94.10%	5.36	542



94.27%	5.31	543
94.44%	5.28	544
94.62%	5.28	545
94.79%	5.24	546
94.97%	5.23	547
95.14%	5.22	548
95.31%	5.20	549
95.49%	5.19	550
95.66%	5.02	551
95.83%	4.97	552
96.01%	4.92	553
96.18%	4.87	554
96.35%	4.72	555
96.53%	4.69	556
96.70%	4.66	557
96.88%	4.65	558
97.05%	4.54	559
97.22%	4.38	560
97.40%	4.20	561
97.57%	4.18	562
97.74%	4.17	563
97.92%	4.15	564
98.09%	4.09	565
98.26%	3.99	566
98.44%	3.97	567
98.61%	3.97	568
98.78%	3.90	569
98.96%	3.37	570
99.13%	3.35	571
99.31%	3.04	572
99.48%	2.97	573
99.65%	2.92	574
99.83%	2.73	575
100.00%	1.99	576

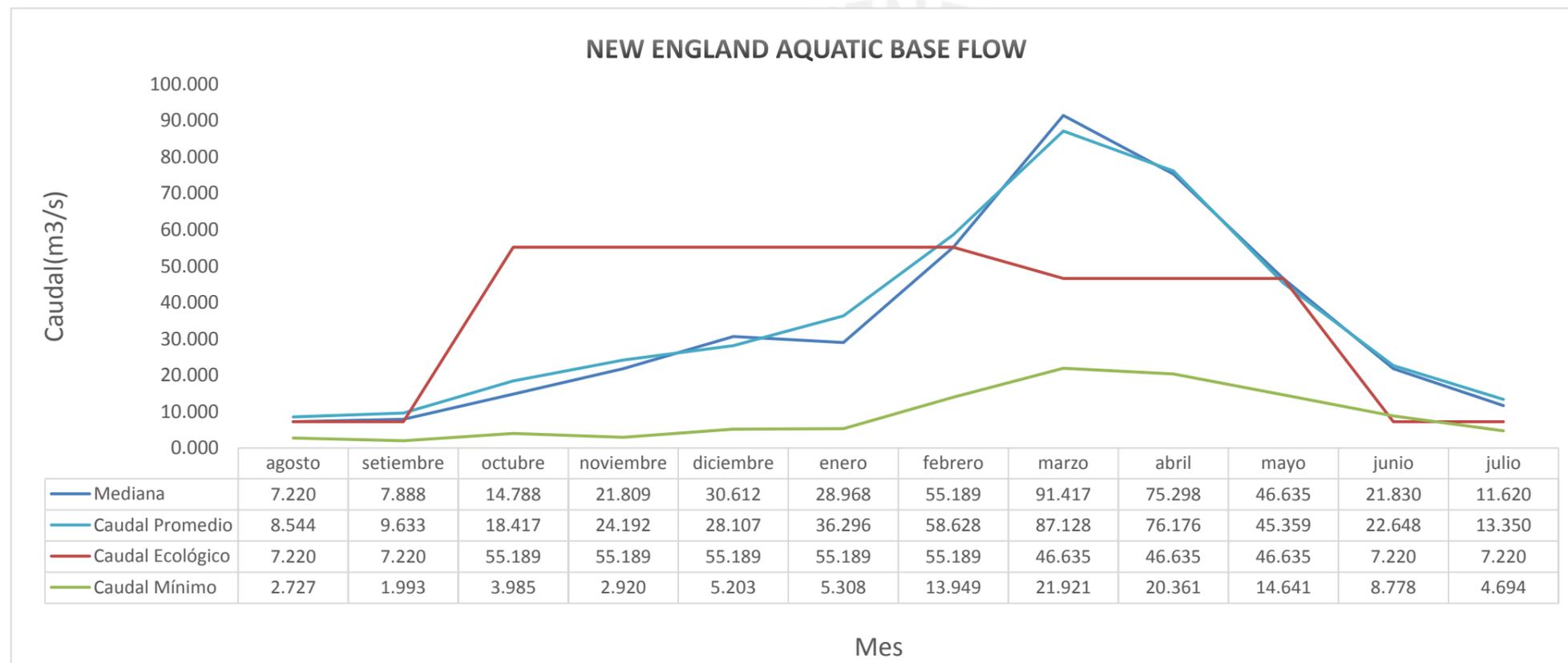


Anexo 3. New England Aquatic Base Flow

Id	Campaña	agosto	setiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
1	1969 - 1970	2.727	1.993	3.985	2.920	5.203	5.308	13.949	21.921	20.361	14.641	8.778	4.694
2	1970-1971	3.353	2.967	4.715	5.360	6.224	5.598	14.967	24.104	28.641	14.756	8.901	5.283
3	1971-1972	3.373	3.038	4.924	6.218	7.789	7.159	15.153	25.772	31.025	17.564	9.465	5.770
4	1972-1973	4.087	3.900	5.222	6.688	7.849	8.874	15.761	27.906	31.714	18.548	10.682	6.255
5	1973-1974	4.169	3.966	6.470	7.441	8.391	12.145	18.049	27.986	34.480	21.680	11.620	7.290
6	1974-1975	4.200	3.974	7.067	8.641	9.472	13.079	24.256	29.304	35.753	24.957	11.861	7.957
7	1975-1976	4.659	4.150	7.437	9.809	10.104	13.519	26.124	30.709	39.038	26.001	12.112	8.312
8	1976-1977	5.192	4.177	7.720	9.846	10.350	14.635	26.717	31.643	41.564	27.323	12.465	8.313
9	1977-1978	5.282	4.380	8.147	9.919	12.183	14.750	27.027	35.236	46.526	28.785	13.321	8.650
10	1978-1979	5.360	4.538	8.458	10.010	13.347	16.542	28.099	35.312	50.177	30.153	15.000	9.016
11	1979-1980	5.374	4.650	8.517	11.982	15.819	18.386	30.188	35.962	50.392	30.554	15.662	9.095
12	1980-1981	5.511	4.870	9.612	12.642	16.395	20.287	36.382	39.226	50.704	32.330	16.120	9.848
13	1981-1982	5.591	4.971	10.095	14.957	17.087	21.616	37.516	41.565	52.696	33.335	17.390	10.018
14	1982-1983	5.675	5.019	10.613	15.381	17.906	21.630	39.242	43.794	54.491	33.812	17.649	10.036
15	1983-1984	5.937	5.229	11.015	17.676	18.075	21.962	39.395	47.341	55.563	34.289	18.193	10.202
16	1984-1985	6.391	5.242	11.190	18.157	18.956	22.553	41.332	58.323	57.359	35.170	18.472	10.400
17	1985-1986	6.455	5.777	11.392	18.215	19.450	22.739	42.711	63.724	58.829	35.477	18.595	10.439
18	1986-1987	6.487	6.235	11.906	18.220	19.802	23.544	42.973	69.804	60.465	36.755	18.748	10.569
19	1987-1988	6.514	6.237	12.866	18.796	20.280	25.217	43.711	70.615	67.076	37.417	19.171	10.861
20	1988-1989	6.550	7.032	13.651	19.012	22.066	26.344	45.042	76.188	68.237	37.559	19.284	10.885
21	1989-1990	6.560	7.612	13.703	19.299	22.081	27.606	48.794	82.347	68.455	38.709	19.663	11.035
22	1990-1991	6.977	7.730	13.901	19.843	24.272	28.016	49.071	83.915	71.380	41.714	19.824	11.332
23	1991-1992	7.065	7.832	14.610	20.091	26.283	28.658	50.877	86.153	73.510	42.722	20.060	11.470
24	1992-1993	7.116	7.834	14.715	21.740	30.259	28.824	54.130	90.059	73.981	46.563	20.476	11.607
25	1993-1994	7.324	7.941	14.861	21.877	30.965	29.112	56.247	92.774	76.614	46.706	23.183	11.632
26	1994-1995	7.382	8.322	14.863	22.083	31.120	30.387	58.950	95.863	83.690	47.115	23.823	11.754
27	1995-1996	7.913	8.479	15.064	26.900	31.912	32.898	59.301	96.712	84.709	47.282	23.914	11.965
28	1996-1997	7.913	9.084	16.078	27.691	31.953	34.872	59.676	100.295	87.794	47.798	23.985	12.119
29	1997-1998	8.107	9.732	16.430	27.744	32.358	37.000	61.154	104.214	88.509	48.799	24.412	12.164
30	1998-1999	8.323	9.742	16.713	28.833	32.514	42.973	63.515	106.846	90.408	49.009	24.584	13.167
31	1999-2000	8.391	9.799	16.826	29.262	33.642	45.015	64.640	108.306	92.164	50.693	25.290	13.259
32	2000-2001	8.562	10.140	16.828	29.405	34.402	45.943	66.701	108.643	92.932	52.176	25.359	13.610
33	2001-2002	9.061	10.623	17.176	32.120	34.562	46.120	66.865	109.448	93.718	52.224	25.460	13.809
34	2002-2003	9.479	11.641	18.878	32.342	35.266	46.208	70.290	111.142	94.000	54.898	27.195	13.969
35	2003-2004	9.667	11.953	22.522	33.132	35.621	46.499	71.424	114.466	95.274	55.623	27.449	14.103
36	2004-2005	10.779	12.023	23.013	33.761	36.069	47.870	72.078	118.937	96.078	58.109	27.866	14.350
37	2005-2006	11.232	12.949	24.641	35.413	36.172	51.356	76.998	121.306	97.919	58.865	28.839	14.431
38	2006-2007	11.493	14.289	25.031	35.553	36.727	52.874	79.967	126.960	99.375	59.995	29.001	14.614
39	2007-2008	11.839	14.398	27.122	36.271	38.545	55.921	89.124	133.833	100.050	61.862	29.008	15.202
40	2008-2009	11.874	14.711	29.291	38.636	39.975	58.834	92.345	134.052	100.977	65.132	30.970	16.767
41	2009-2010	11.984	15.048	36.483	39.247	41.878	61.188	96.269	137.733	102.192	65.692	31.747	17.848

42	2010-2011	12.802	15.965	38.904	39.706	43.962	65.703	100.059	138.654	109.727	65.996	32.095	20.088
43	2011-2012	13.683	18.026	40.012	41.813	44.629	65.860	105.115	140.798	111.612	70.326	32.337	22.499
44	2012-2013	15.005	19.627	41.464	41.968	45.022	66.081	105.354	143.716	116.280	72.936	33.563	24.201
45	2013-2014	17.114	20.416	43.446	44.032	50.026	66.780	107.614	151.519	120.853	74.010	36.568	26.228
46	2014-2015	18.829	21.091	43.561	45.165	56.266	75.355	114.359	161.400	121.013	74.480	38.075	27.231
47	2015-2016	19.734	23.348	45.987	47.431	58.606	80.618	117.276	172.094	132.199	77.362	40.795	30.962
48	2016-2017	21.025	29.661	46.910	47.969	77.295	107.729	147.371	173.544	145.950	79.338	48.068	35.475
Mediana		7.220	7.888	14.788	21.809	30.612	28.968	55.189	91.417	75.298	46.635	21.830	11.620

Caudal Ecológico	7.220	7.220	55.189	55.189	55.189	55.189	55.189	55.189	46.635	46.635	46.635	7.220	7.220
Caudal Mínimo	2.727	1.993	3.985	2.920	5.203	5.308	13.949	21.921	20.361	14.641	8.778	4.694	
Caudal Máximo	21.025	29.661	46.910	47.969	77.295	107.729	147.371	173.544	145.950	79.338	48.068	35.475	
Caudal Promedio	8.544	9.633	18.417	24.192	28.107	36.296	58.628	87.128	76.176	45.359	22.648	13.350	

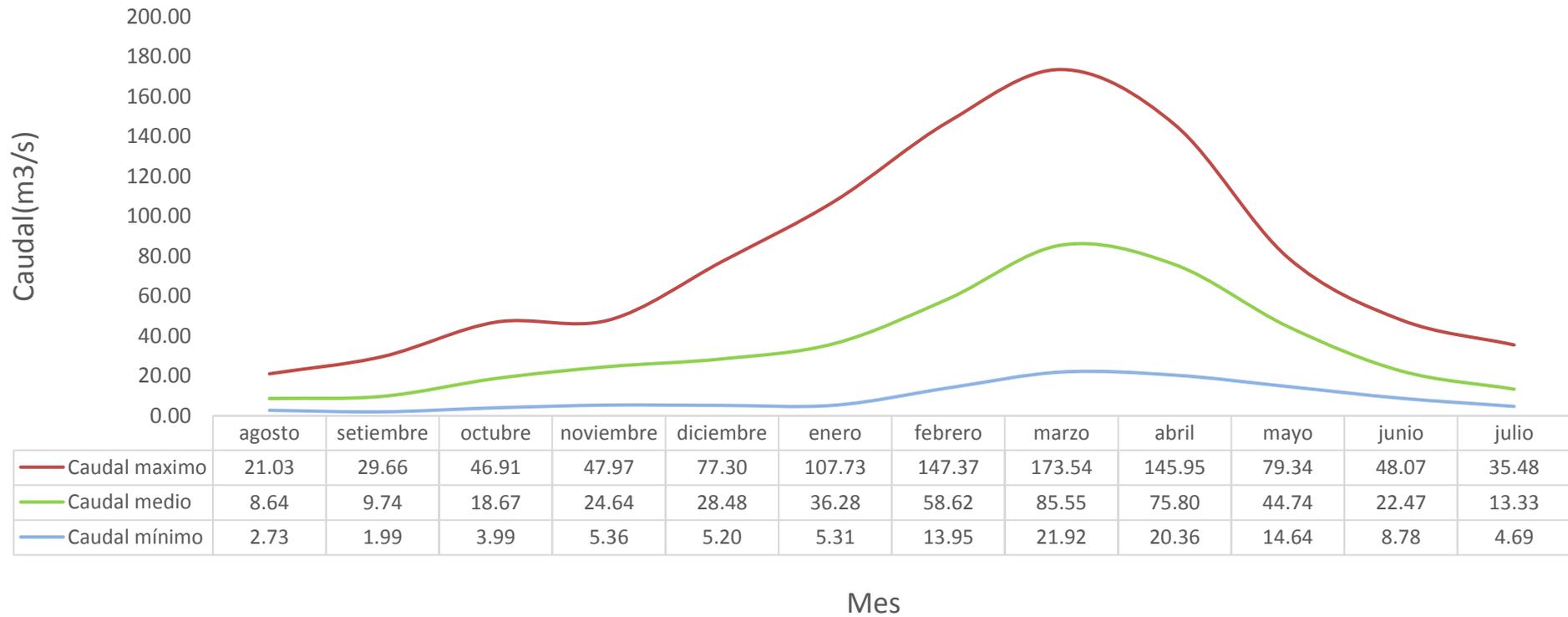


ANEXO 4. CAUDAL MENSUAL

Caudales del historico

	agosto	setiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
Caudal medio	8.64	9.74	18.67	24.64	28.48	36.28	58.62	85.55	75.80	44.74	22.47	13.33
Caudal maximo	21.03	29.66	46.91	47.97	77.30	107.73	147.37	173.54	145.95	79.34	48.07	35.48
Caudal mínimo	2.73	1.99	3.99	5.36	5.20	5.31	13.95	21.92	20.36	14.64	8.78	4.69

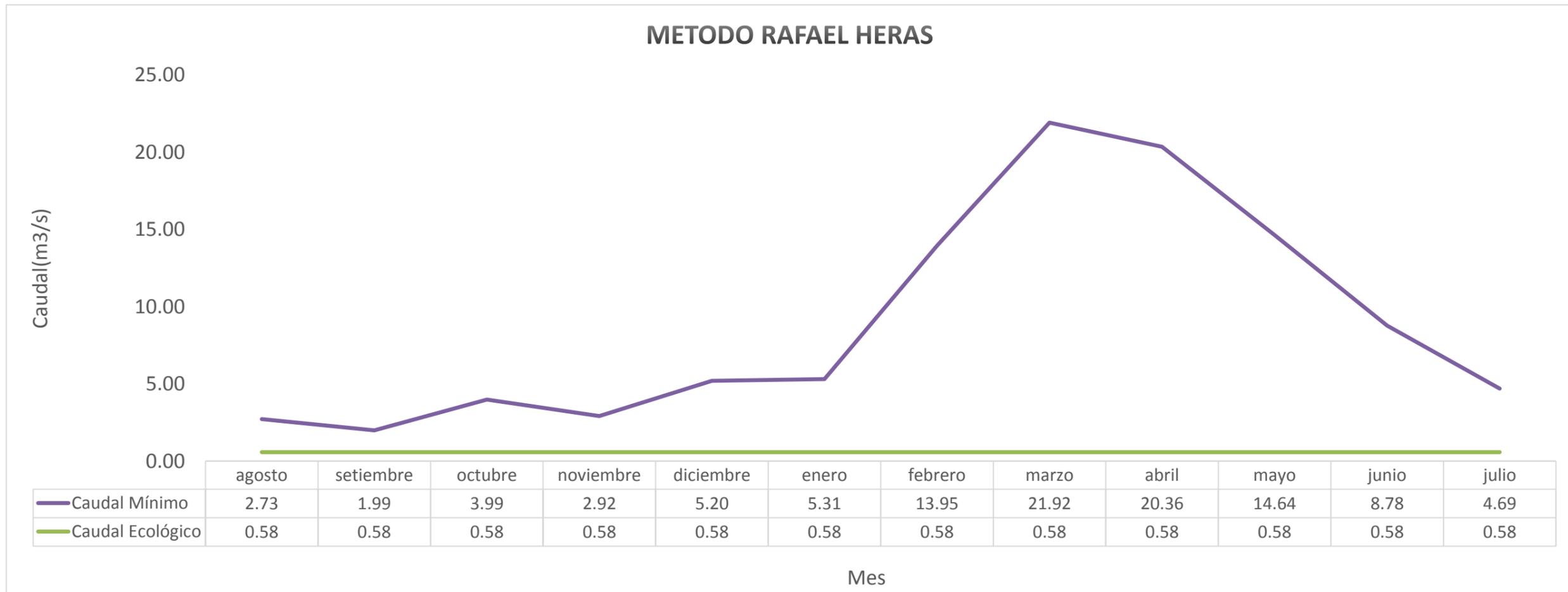
CAUDALES MEDIOS MENSUALES



ANEXO 5. RAFAEL HERAS

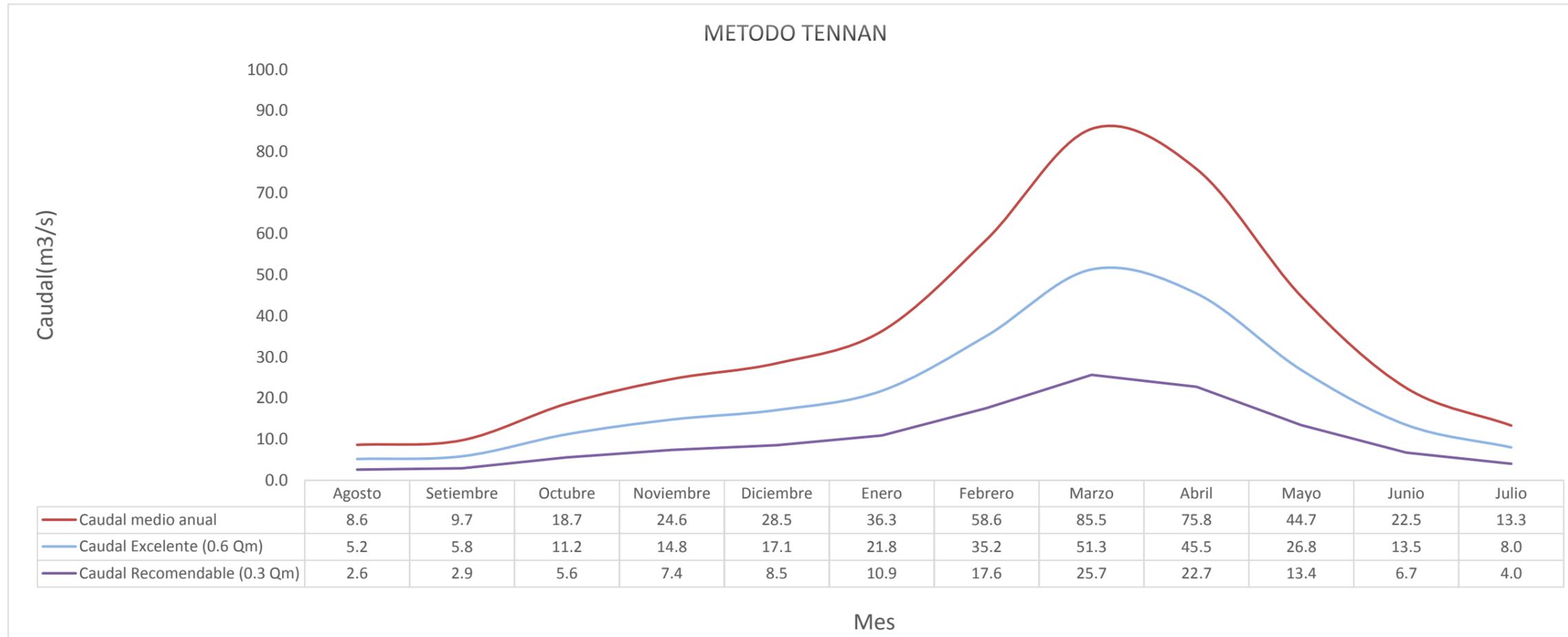
Campaña	agosto	setiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	Promedio tres meses consecutivos mas bajos
1969 - 1970	8.11	7.83	14.72	33.13	56.27	45.02	26.72	47.34	50.18	74.01	27.20	13.97	10.22
1970-1971	8.39	12.02	38.90	39.71	58.61	51.36	64.64	172.09	102.19	46.56	32.34	20.09	19.77
1971-1972	21.03	19.63	46.91	41.81	44.63	46.12	36.38	143.72	84.71	41.71	25.29	15.20	27.40
1972-1973	11.23	9.80	17.18	18.22	26.28	29.11	30.19	63.72	132.20	54.90	32.10	30.96	12.74
1973-1974	18.83	23.35	16.43	45.17	31.91	45.94	71.42	58.32	50.70	32.33	24.41	16.77	19.54
1974-1975	13.68	20.42	45.99	32.34	34.40	61.19	92.35	173.54	120.85	60.00	33.56	22.50	18.87
1975-1976	19.73	29.66	43.56	41.97	41.88	46.21	42.97	70.62	92.16	52.18	29.00	24.20	24.31
1976-1977	15.01	14.40	13.90	9.92	8.39	30.39	100.06	90.06	67.08	38.71	23.82	13.81	10.74
1977-1978	8.56	8.48	10.61	27.74	32.36	13.08	15.76	27.91	41.56	47.12	19.66	11.63	9.22
1978-1979	7.38	9.73	8.15	17.68	19.45	27.61	24.26	111.14	46.53	36.76	18.19	12.16	8.42
1979-1980	9.06	18.03	8.46	6.22	5.20	5.60	13.95	24.10	28.64	14.76	10.68	8.31	5.67
1980-1981	3.37	2.97	8.52	35.41	35.62	28.66	89.12	104.21	121.01	61.86	38.08	27.23	4.95
1981-1982	17.11	21.09	22.52	27.69	32.51	22.55	39.24	30.71	52.70	42.72	23.18	13.17	17.12
1982-1983	7.32	10.62	40.01	36.27	77.30	75.36	43.71	138.65	100.05	72.94	31.75	14.10	10.68
1983-1984	7.91	12.95	12.87	10.01	30.97	16.54	117.28	118.94	71.38	65.69	29.01	26.23	11.24
1984-1985	11.84	14.29	43.45	21.88	24.27	14.64	18.05	25.77	20.36	14.64	8.90	5.28	8.67
1985-1986	6.49	7.94	18.88	7.44	15.82	32.90	42.71	29.30	93.72	47.80	17.39	11.61	8.68
1986-1987	11.49	7.61	13.65	35.55	30.26	80.62	70.29	39.23	31.03	27.32	11.62	9.02	9.37
1987-1988	12.80	11.95	15.06	19.84	13.35	34.87	66.70	35.31	54.49	37.56	20.06	10.57	11.77
1988-1989	7.91	9.08	16.83	33.76	17.09	66.08	105.35	92.77	97.92	30.55	15.66	9.10	8.70
1989-1990	5.51	10.14	36.48	19.01	10.10	7.16	27.03	21.92	35.75	28.79	28.84	13.26	9.64
1990-1991	6.98	4.97	25.03	29.26	34.56	13.52	26.12	82.35	57.36	47.28	13.32	7.96	6.64
1991-1992	5.28	3.97	5.22	8.64	12.18	25.22	14.97	35.24	60.47	33.34	19.28	8.65	4.83
1992-1993	5.19	8.32	16.71	11.98	7.85	12.15	63.52	126.96	116.28	58.87	25.46	12.12	8.54
1993-1994	7.07	7.83	27.12	47.43	17.91	66.78	79.97	95.86	68.24	37.42	19.17	10.04	8.31
1994-1995	5.68	3.97	4.72	29.41	31.95	14.75	49.07	43.79	50.39	24.96	12.11	7.29	4.79
1995-1996	4.09	4.87	13.70	39.25	39.98	47.87	72.08	96.71	73.98	33.81	17.65	5.77	4.91
1996-1997	4.17	5.02	23.01	22.08	6.22	5.31	56.25	31.64	31.71	17.56	9.47	4.69	4.63
1997-1998	2.73	1.99	3.99	18.16	45.02	58.83	96.27	134.05	145.95	79.34	23.99	10.89	2.90
1998-1999	6.55	7.03	10.10	19.30	7.79	18.39	105.12	83.92	87.79	65.13	48.07	35.48	7.89
1999-2000	10.78	15.05	29.29	12.64	36.07	8.87	45.04	108.64	88.51	77.36	36.57	17.85	14.56
2000-2001	11.98	11.64	11.39	5.36	35.27	55.92	41.33	137.73	96.08	46.71	25.36	13.61	9.46
2001-2002	6.51	15.97	11.19	28.83	33.64	21.63	50.88	106.85	100.98	35.48	18.60	11.04	11.22
2002-2003	4.66	3.90	14.61	38.64	50.03	28.02	59.68	41.57	58.83	35.17	23.91	11.47	6.68
2003-2004	5.59	5.78	7.07	15.38	19.80	23.54	15.15	27.99	34.48	30.15	11.86	9.85	6.15
2004-2005	11.87	4.65	16.83	47.97	43.96	20.29	39.40	114.47	55.56	18.55	8.78	6.26	7.59
2005-2006	3.35	3.04	24.64	18.80	16.40	28.82	77.00	151.52	83.69	21.68	19.82	10.02	5.47
2006-2007	6.46	5.23	4.92	14.96	38.55	42.97	28.10	76.19	95.27	52.22	15.00	10.40	5.54
2007-2008	6.39	4.54	14.86	44.03	18.08	52.87	114.36	109.45	111.61	55.62	24.58	11.97	7.63
2008-2009	9.67	14.71	41.46	18.22	18.96	65.86	107.61	140.80	68.46	49.01	27.87	14.43	12.94
2009-2010	8.32	6.24	9.61	21.74	36.17	22.74	61.15	69.80	90.41	50.69	18.47	10.86	8.06

2010-2011	5.94	7.73	7.44	6.69	9.47	26.34	59.30	35.96	109.73	34.29	12.47	10.20	7.03
2011-2012	5.36	6.24	11.02	9.81	36.73	107.73	147.37	108.31	99.38	58.11	20.48	11.33	7.54
2012-2013	5.37	4.18	11.91	32.12	22.07	46.50	54.13	133.83	76.61	70.33	40.80	14.61	7.15
2013-2014	9.48	5.24	16.08	9.85	22.08	21.62	37.52	100.30	39.04	66.00	18.75	10.44	8.39
2014-2015	7.12	9.74	14.86	20.09	31.12	65.70	48.79	121.31	92.93	48.80	27.45	11.75	9.54
2015-2016	6.56	4.15	7.72	26.90	20.28	21.96	66.87	86.15	73.51	26.00	16.12	8.31	6.14
2016-2017	4.20	4.38	6.47	2.92	10.35	37.00	58.95	161.40	94.00	74.48	30.97	14.35	4.59
Caudal Máximo	21.03	29.66	46.91	47.97	77.30	107.73	147.37	173.54	145.95	79.34	48.07	35.48	0.58
Caudal Medio	8.54	9.63	18.42	24.19	28.11	36.30	58.63	87.13	76.18	45.36	22.65	13.35	
Caudal Ecológico	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	
Caudal Mínimo	2.73	1.99	3.99	2.92	5.20	5.31	13.95	21.92	20.36	14.64	8.78	4.69	



ANEXO 6. METODO DE TENNAN

Tipo	Mes											
	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Caudal medio anual	8.6	9.7	18.7	24.6	28.5	36.3	58.6	85.5	75.8	44.7	22.5	13.3
Caudal Excelente (0.6 Qm)	5.2	5.8	11.2	14.8	17.1	21.8	35.2	51.3	45.5	26.8	13.5	8.0
Caudal Recomendable (0.3 Qm)	2.6	2.9	5.6	7.4	8.5	10.9	17.6	25.7	22.7	13.4	6.7	4.0



ANEXO 7. DATOS RECOLECTADOS

SECCIÓN 00

Coordenadas (m)			Velocidad (m/s)		
X	Y	Z	@8.64	@9.5	@35
0	0	2.34	0	0	0
1	0	2.34	0	0	0
1.5	0	0.96	0.1	0.15	0.4
2.5	0	0.96	0.1	0.15	0.6
3.8	0	0.77	0.2	0.25	0.8
5.1	0	0.78	0.2	0.25	0.6
6.4	0	0.82	0.2	0.25	0.6
7.7	0	0.91	0.1	0.15	0.6
9	0	0.92	0.1	0.15	0.65
10.3	0	0.93	0.1	0.15	0.6
11.6	0	0.9	0.1	0.15	0.6
12.9	0	0.91	0.1	0.15	0.6
13.8	0	0.96	0.05	0.1	0.6
18.8	0	0.96	0.05	0.1	0.7
19.8	0	0.88	0.1	0.2	1
20.8	0	0.68	0.1	0.3	1.2
21.8	0	0.67	0.2	0.3	1.3
22.8	0	0.6	0.25	0.35	1.35
23.8	0	0.54	0.35	0.4	1.4
24.8	0	0.5	0.4	0.45	1.4
25.8	0	0.36	0.45	0.55	1.4
26.8	0	0.36	0.55	0.6	1.5
27.8	0	0.29	0.6	0.65	1.5
28.8	0	0.23	0.7	0.75	1.5
29.8	0	0.28	0.75	0.8	1.5
30.8	0	0.23	0.8	0.85	1.55
31.8	0	0.16	0.85	0.9	1.55
32.8	0	0.12	0.85	0.9	1.55
33.8	0	0.14	0.9	0.95	1.55
34.8	0	0	0.95	1	1.6
35.8	0	0.01	0.9	0.95	1.45
36.8	0	0.12	0.75	0.8	1.3
37.8	0	0.96	0.5	0.6	1.05
38.8	0	0.96	0.15	0.2	0.8
39.8	0	2.34	0	0	0
40.8	0	2.34	0	0	0

SECCION 01

Coordenadas (m)			Velocidad (m/s)		
X	Y	Z	@8.64	@9.5	@35
0	10	2.413	0.00	0.00	0.00
1	10	2.413	0.00	0.00	0.00
1.5	10	1.033	0.00	0.00	0.25
2.5	10	1.033	0.00	0.00	0.60
3.8	10	0.843	0.15	0.20	0.80
5.1	10	0.853	0.15	0.20	0.80
6.4	10	0.893	0.15	0.20	0.80
7.7	10	0.983	0.10	0.15	0.60
9	10	0.993	0.10	0.15	0.62
10.3	10	1.003	0.00	0.10	0.60
11.6	10	0.973	0.10	0.15	0.60
12.9	10	0.983	0.10	0.15	0.60
13.8	10	1.033	0.00	0.00	0.60
23.8	10	1.033	0.00	0.00	0.60
24.8	10	0.703	0.20	0.25	0.70
25.8	10	0.633	0.53	0.55	0.80
26.8	10	0.273	0.60	0.70	1.00
27.8	10	0.173	0.70	0.75	1.10
28.8	10	0.153	0.70	0.75	1.20
29.8	10	0.163	0.75	0.80	1.25
30.8	10	0.133	0.70	0.75	1.30
31.8	10	0.163	0.80	0.85	1.50
32.8	10	0.093	0.95	1.00	1.50
33.8	10	0.063	0.80	0.85	1.60
34.8	10	0.153	0.70	0.75	1.60
35.8	10	0.203	0.60	0.65	1.45
36.8	10	0.213	0.55	0.60	1.30
37.8	10	0.383	0.40	0.50	1.00
38.8	10	1.033	0.00	0.00	0.80
39.8	10	1.033	0.00	0.00	0.25
40.8	10	2.413	0.00	0.00	0.00
41.8	10	2.413	0.00	0.00	0.00

SECCION 02

Coordenadas (m)			Velocidad (m/s)		
X	Y	Z	@8.64	@9.5	@35
0	20	2.556	0.00	0.00	0.00
1	20	2.556	0.00	0.00	0.00
1.5	20	1.176	0.00	0.00	0.50
2.5	20	1.176	0.00	0.00	0.60
3.8	20	0.986	0.00	0.00	1.00
5.1	20	0.996	0.00	0.00	1.00
6.4	20	1.036	0.00	0.00	0.80
7.7	20	1.126	0.00	0.00	0.80
9	20	1.136	0.00	0.00	0.80
10.3	20	1.146	0.00	0.00	0.80
11.6	20	1.116	0.00	0.00	0.85
12.9	20	1.126	0.00	0.00	0.80
13.8	20	1.176	0.00	0.00	0.80
28.8	20	1.176	0.00	0.00	0.80
29.8	20	0.876	0.40	0.50	1.50
30.8	20	0.526	0.80	0.90	1.70
31.8	20	0.486	1.00	1.20	1.80
32.88	20	0.226	1.20	1.30	2.00
33.8	20	0.176	1.60	1.70	2.40
34.8	20	0.276	1.40	1.55	2.10
35.8	20	0.126	1.60	1.70	2.40
36.8	20	0.276	1.40	1.55	2.20
37.8	20	0.526	1.20	1.30	1.70
38.8	20	0.576	1.00	1.10	1.60
39.8	20	0.676	0.80	0.90	1.50
40.8	20	1.176	0.00	0.00	1.10
41.8	20	1.176	0.00	0.00	0.50
42.8	20	2.556	0.00	0.00	0.00
43.8	20	2.556	0.00	0.00	0.00

ANEXO 8. SIMULACIÓN HIDRÁULICA

SIMULACIÓN DE NIVEL DE SUPERFICIE PARA CADA SECCIÓN

Sección	Tirante para cada caudal (m)												
	@0.5	@1	@3	@5	@8.6	@9.5	@15	@20	@25	@35	@50	@65	@85
0	0.45	0.55	0.75	0.87	1.02	1.04	1.19	1.29	1.38	1.52	1.68	1.82	1.96
1	0.48	0.58	0.78	0.90	1.05	1.08	1.22	1.32	1.40	1.54	1.70	1.83	1.97
2	0.48	0.58	0.78	0.90	1.05	1.08	1.22	1.32	1.40	1.54	1.70	1.83	1.97

GRÁFICO SECCIÓN 00

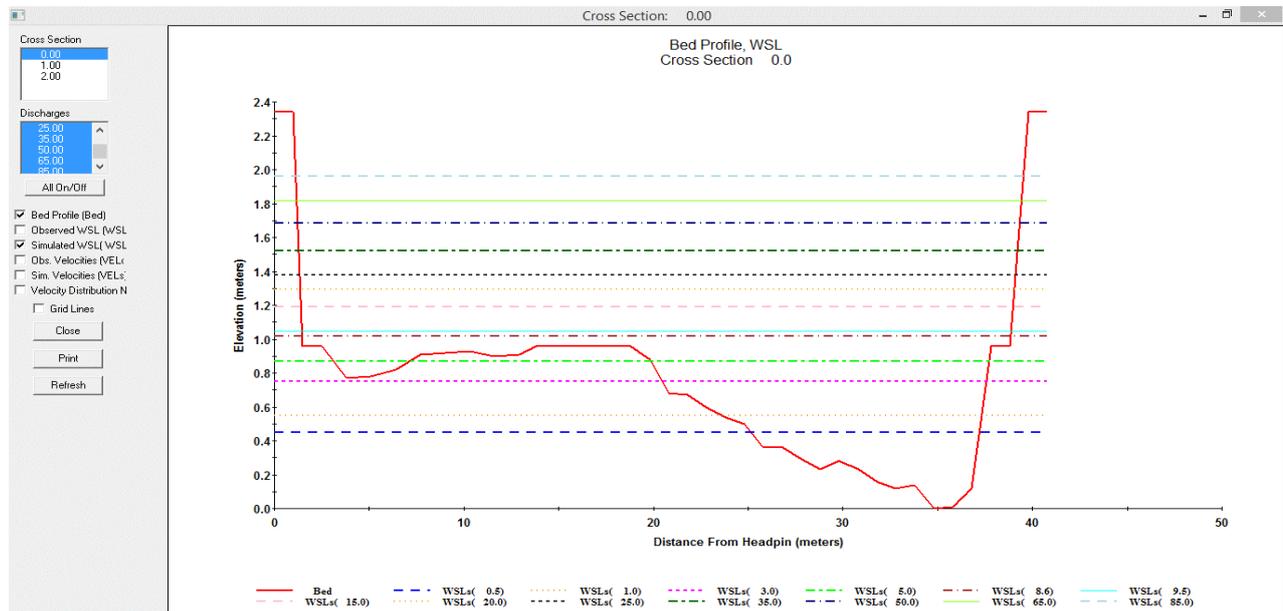


GRÁFICO SECCIÓN 01

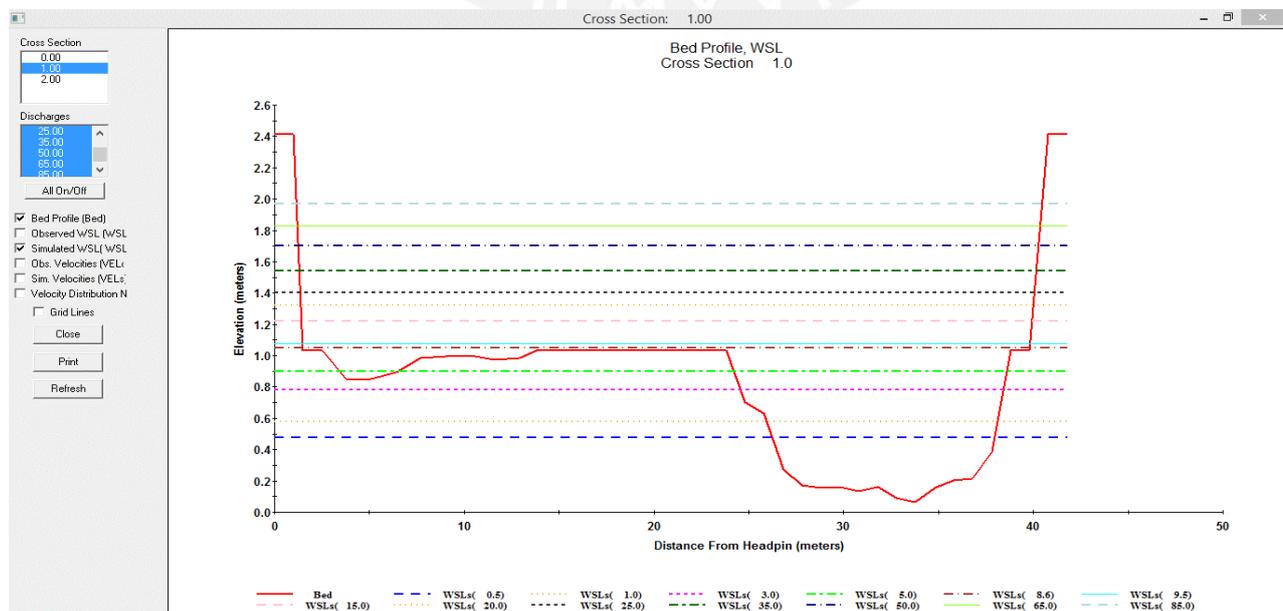
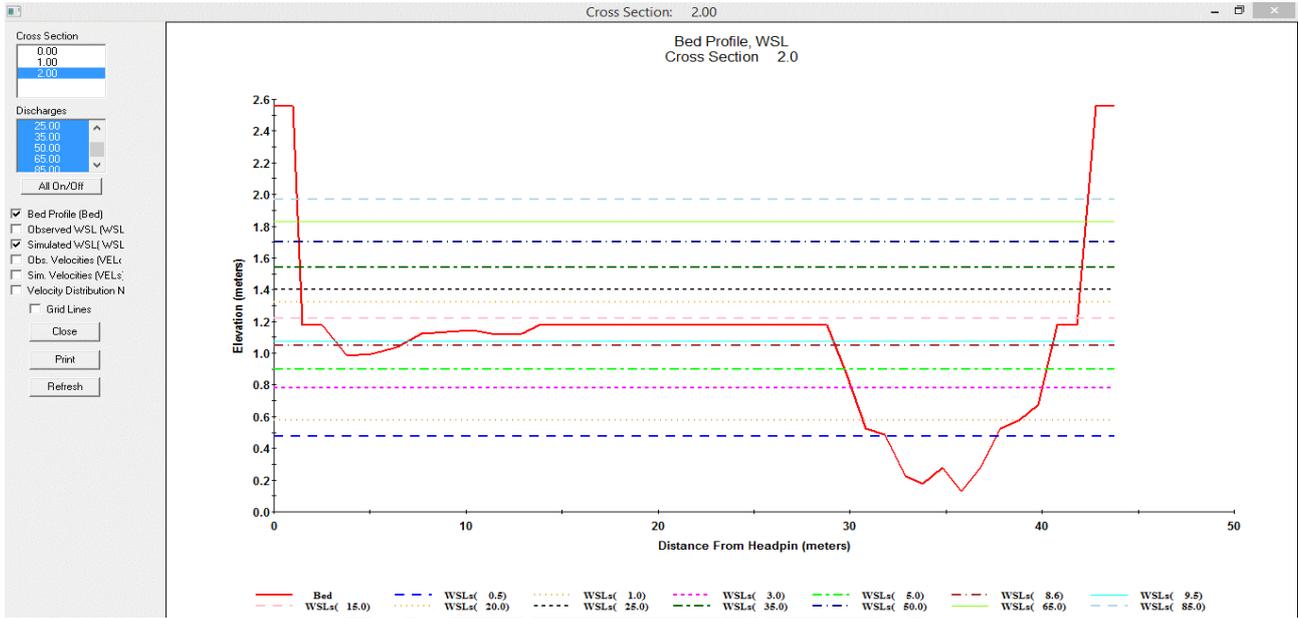
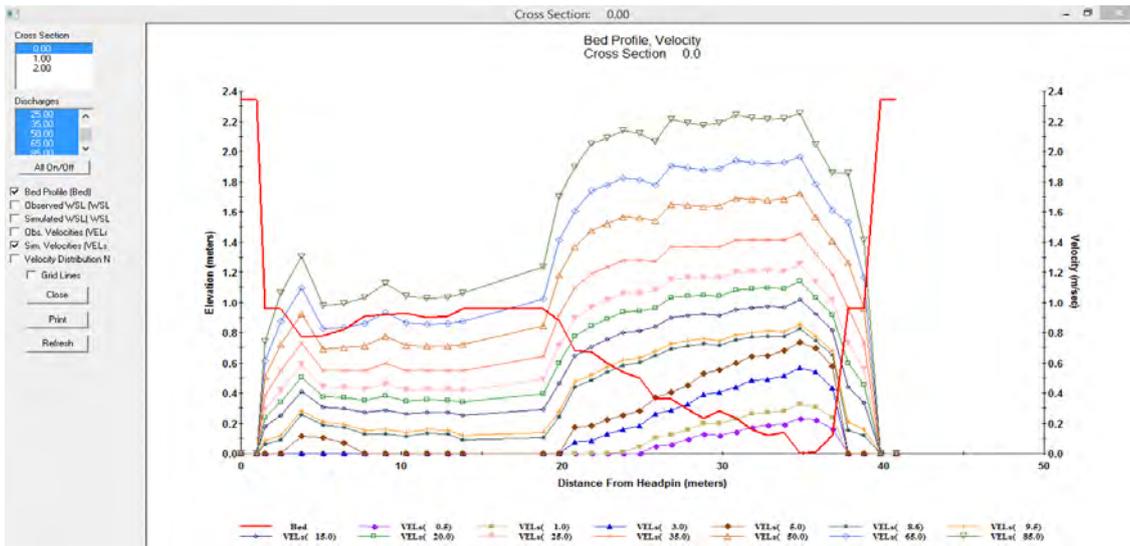


GRÁFICO SECCIÓN 02

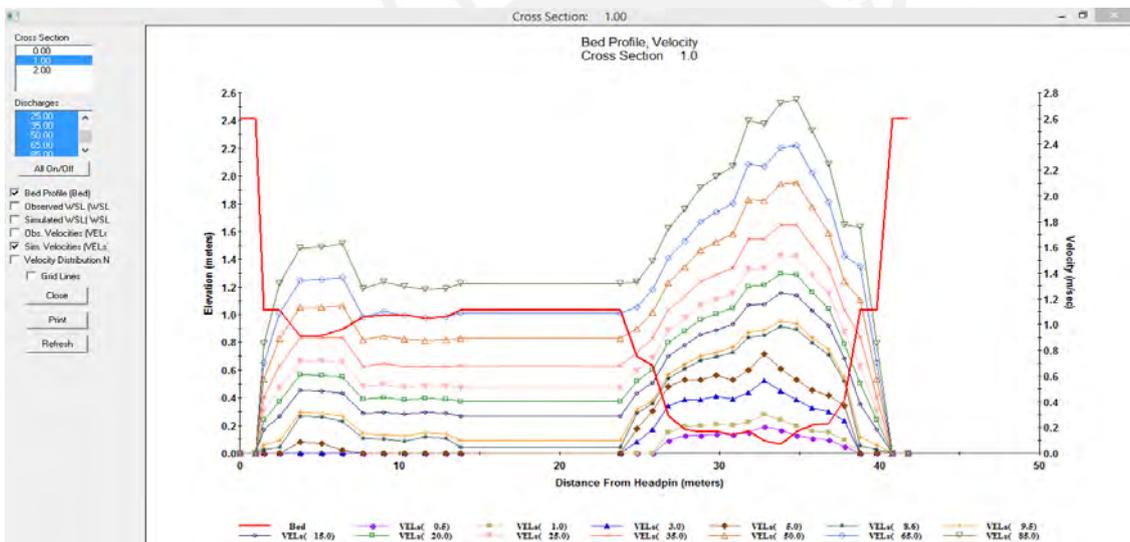


Gráficos de las secciones mostradas.

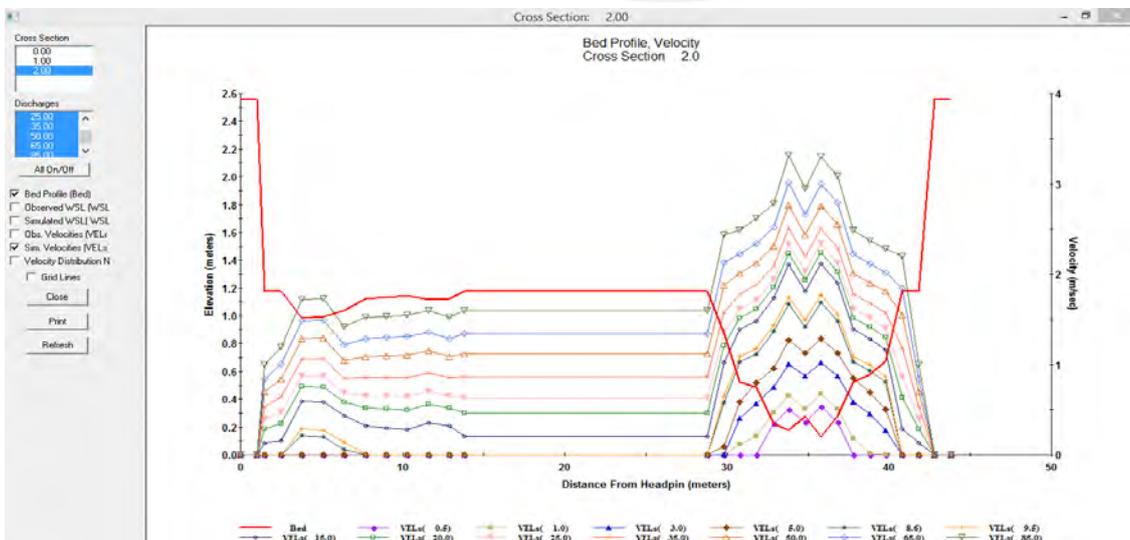
Sección 00



Sección 01



Sección 02



ANEXO 9. SIMULACIÓN DE HABITAT

Caudal (m3/s)	Superficie ponderada útil					Porcentaje de SPU			
	Area Total	Fresa	Juvenil	Alevin	Adulto	Fresa	Juvenil	Alevin	Adulto
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.50	10300.48	3399.32	5687.86	7135.93	3402.09	33.00%	55.22%	69.28%	33.03%
1.00	11516.34	6427.47	7920.22	8408.43	4360.63	55.81%	68.77%	73.01%	37.86%
3.00	13686.93	5594.52	8229.71	5542.83	4427.24	40.87%	60.13%	40.50%	32.35%
5.00	16831.43	3513.41	7056.82	3785.84	3744.71	20.87%	41.93%	22.49%	22.25%
8.64	32121.56	3340.39	4984.52	3756.89	2933.65	10.40%	15.52%	11.70%	9.13%
9.50	32329.33	3862.89	4872.26	4292.20	2939.95	11.95%	15.07%	13.28%	9.09%
15.00	38726.07	11083.65	7971.04	11850.20	4236.04	28.62%	20.58%	30.60%	10.94%
20.00	38836.21	14166.52	13934.44	11572.98	6425.82	36.48%	35.88%	29.80%	16.55%
25.00	38927.94	9095.58	13638.47	8282.61	6267.37	23.37%	35.04%	21.28%	16.10%
35.00	39077.53	4749.90	9254.31	3689.08	4772.78	12.16%	23.68%	9.44%	12.21%
50.00	39252.20	1366.40	4072.32	821.26	3342.30	3.48%	10.37%	2.09%	8.51%
65.00	39392.26	716.69	2090.36	592.58	1965.64	1.82%	5.31%	1.50%	4.99%
85.00	39546.48	608.95	1072.08	456.78	782.69	1.54%	2.71%	1.16%	1.98%

Relación Habitat Caudal

