

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**BASES Y CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES
ECOLOGICOS EN RÍOS ALTOANDINOS TROPICALES**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER EN RECURSOS
HÍDRICOS**

VERÓNICA VALERIA YÉPEZ MARTÍNEZ
vevaym@hotmail.es

DIRECTORA: ING. NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA MSC.
nathalia.valencia@gmail.com

Quito, Octubre 2016

DECLARACIÓN

Yo, Verónica Valeria Yépez Martínez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo el derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Verónica Valeria Yépez Martínez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Verónica Valeria Yépez Martínez, bajo mi supervisión.

**Ing. Nathalia Valencia. MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme y hacer que este sueño se realice, por sus bendiciones que día a día me fortalecen.

A mis padres Jorge y Eva quienes son las personas más importantes, que me han impulsado a seguir adelante, que todos los días están presentes haciéndome sentir su apoyo incondicional, por ese ejemplo de lucha y perseverancia.

A Ing. Nathalia Valencia por brindarme su apoyo.

A todas las personas que pusieron su granito de arena para cumplir con este sueño.

Verónica Yépez Martínez

DEDICATORIA

Con todo mi amor dedico este trabajo a Dios y a mi familia por darme las fuerzas para seguir adelante y no desmayar.

A mis sobrinos que son mi motivación, inspiración y felicidad, porque llegaron a mi vida y no tengo palabras para expresarles mi cariño.

A mi hermano y cuñada por su cariño y ayuda incondicional.

Verónica Yépez Martínez

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN..... | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.4 MARCO LEGAL..... | 3 |
| 1.5 DEFINICIONES BÁSICAS..... | 6 |
| CAPITULO 2..... | 13 |
| SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA..... | 13 |
| 2.1 ANÁLISIS DE LA LITERATURA TÉCNICA PARA LAS DIFERENTES METODOLOGIAS DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 13 |
| 2.2 METODOLOGÍAS..... | 14 |
| 2.3 CLASIFICACIÓN REBBECA THARME..... | 14 |
| 2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA EXISTENTE..... | 69 |
| 2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 3..... | 78 |
| CRITERIOS Y BASES PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 78 |
| 3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 78 |
| 3.2 EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES FÍSICAS SOBRE LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 79 |
| 3.3 RECOPIACIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 122 |
| CAPÍTULO 4..... | 139 |
| GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN RÍOS ALTOANDINOS TROPICALES..... | 139 |
| 4.1 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN RÍOS ALTOANDINOS TROPICALES..... | 139 |
| 4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 142 |
| 4.3 MÉTODO DEL CAUDAL BASE DE MANTENIMIENTO..... | 159 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 5..... | 163 |
| PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO.... | 163 |
| 5.1 HOJA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 163 |
| 5.2 EJEMPLO DE CÁLCULO..... | 167 |
| CONCLUSIONES..... | 172 |
| RECOMENDACIONES..... | 174 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1 CLASIFICACIÓN REBECCA THARME..... | 14 |
| FIGURA 2.2 ESQUEMA DE CÁLCULO RVA..... | 26 |
| FIGURA 2.3 ESQUEMA DE CÁLCULO CAUDAL BASE..... | 35 |
| FIGURA 2.4 CURVA DE PERMANENCIA O DURACIÓN DE CAUDALES..... | 38 |
| FIGURA 2.5 MÉTODO DEL PERÍMETRO MOJADO..... | 42 |
| FIGURA 2.6 CURVA CAUDAL – PERÍMETRO MOJADO..... | 43 |
| FIGURA 2.7 ZONAS CRÍTICAS..... | 49 |
| FIGURA 2.8 COMPONENTES PHABSIM..... | 51 |
| FIGURA 2.9 PROCESO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA..... | 52 |
| FIGURA 2.10 CURVA DE PREFERENCIA REFERENCIAL TRUCHA ARCO IRIS..... | 54 |
| FIGURA 2.11 RELACIÓN Q-IH PARA LOS CUATRO ESTADIOS DE LA TRUCHA..... | 55 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 3.1 EJEMPLO CURVA DE DURACIÓN GENERAL..... | 80 |
| FIGURA 3.2 ESQUEMA DE CUENCAS VECINAS..... | 81 |
| FIGURA 3.3 ORDEN DE LA CUENCA..... | 86 |
| FIGURA 3.4 DENSIDAD DE DRENAJE..... | 87 |
| FIGURA 3.5 SINUOSIDAD DE LAS CORRIENTES..... | 88 |
| FIGURA 3.6 PENDIENTE DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA MÉTODO DE LAS PENDIENTES..... | 89 |
| FIGURA 3.7 EJEMPLO DE LA CURVA HIPSOMÉTRICA..... | 90 |
| FIGURA 3.8 PENDIENTE DE LA CORRIENTE PRINCIPAL..... | 92 |
| FIGURA 3.9 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CAUCE FLUVIAL..... | 95 |
| FIGURA 3.10 CELDA PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD MEDIA Y EL CAUDAL..... | 96 |
| FIGURA 3.11 TIPOS DE CUENCAS Y VALLES..... | 109 |
| FIGURA 3.12 CLASIFICACIÓN DE LOS CAUCES FLUVIALES ATENDIENDO A SU PENDIENTE LONGITUDINAL, LA SECCIÓN DEL CAUCE Y LA SINUOSIDAD DEL TRAZADO..... | 112 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 3.13 DISTINTAS SECCIONES TRANSVERSALES EN FUNCIÓN DE LA NATURALEZA DEL SUSTRATO Y SU CORRESPONDENCIA CON EL TRAZADO LONGITUDINAL..... | 112 |
| FIGURA 3.14 POSIBILIDAD DE EROSIÓN DE LOS BANCOS LATERALES EN FUNCIÓN DE SU FORMA Y DE LOS MATERIALES QUE LOS CONFORMAN..... | 117 |
| FIGURA 3.15 SECCIONES TRANSVERSALES EN UN TRAMO..... | 126 |
| FIGURA 3.16 LAVANTAMIENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL..... | 127 |
| FIGURA 3.17 ANCHO CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE SECCIÓN PLENA O BANK FULL..... | 128 |
| FIGURA 3.18 DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD..... | 130 |
| FIGURA 3.19 ESQUEMA DE DISPOSICIÓN DE CARRILES..... | 135 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 3.20 ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN FINAL DE LAS ZONAS DE MUESTREO DE ACUERDO CON LA CAPACIDAD DE ACCESO AL RÍO Y LA RESTRICCIÓN DE MUESTREO HACIA LAS MÁRGENES DEL RÍO... | 136 |
| FIGURA 4.1 FASES Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES METODOLOGÍA..... | 140 |
| FIGURA 4.2 COORDENADAS DEL RÍO JATUNHUAYCU..... | 144 |
| FIGURA 4.3 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO JATUNHUAYCU... | 151 |
| FIGURA 4.4 MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO JATUNHUAYCU..... | 152 |
| FIGURA 4.5 MAPA DE COVERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RÍO JATUNHUAYCU..... | 153 |
| FIGURA 4.6 MAPA DE LA TEXTURA DEL LA CUENCA DEL RÍO JATUNHUAYCU..... | 154 |
| FIGURA 4.7 DATOS ANUALES DE PLUVIÓMETROS DE LAS ESTACIONES EN LA RESERVA ECOLÓGICA DEL ANTISANA..... | 156 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4.8 CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS MENSUALES DEL RÍO JATUNHUAYCU..... | 158 |
| FIGURA 4.9 MEDIA MÓVIL RÍO JATUNHUAYCU..... | 160 |
| FIGURA 5.1 BASE DE DATOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES..... | 163 |
| FIGURA 5.2 PANTALLA DE ACTUALIZACIÓN (CAMBIAR ORIGEN DE DATOS)..... | 164 |
| FIGURA 5.3 HOJA CAUDAL MEDIO MENSUAL MULTIANUAL..... | 165 |
| FIGURA 5.4 DATOS CAUDALES MEDIO DIARIOS..... | 165 |
| FIGURA 5.5 CÁLCULO DE LA MEDIA MÓVIL..... | 166 |
| FIGURA 5.6 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 166 |
| FIGURA 5.7 CAUDAL ECOLÓGICO RÍO JATUNHUAYCU..... | 168 |
| FIGURA 5.8 CAUDALES ECOLÓGICOS PARA 5 DÍAS..... | 169 |
| FIGURA 5.9 CAUDAL ECOLÓGICO OTROS MÉTODOS..... | 170 |
| FIGURA 5.10 CURVA DE DURACIÓN GENERAL RÍO JATUNHUAYCU..... | 171 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 2.1 RECOMENDACIONES DE CAUDAL SEGÚN TENNANT..... | 16 |
| TABLA 2.2 CAUDAL SEGÚN HOPPE..... | 18 |
| TABLA 2.3 CAUDAL MÉTODO SUIZO..... | 20 |
| TABLA 2.4 CAUDAL MÉTODO ARKANSAS..... | 24 |
| TABLA 2.5 CAUDAL MÉTOD DE TEXAS..... | 25 |
| TABLA 2.6 INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDRLÓGICA..... | 28 |
| TABLA 2.7 INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INFLUENCIA CON EL ECOSISTEMA..... | 29 |
| TABLA 2.8 INDICADORES COMPONENTES DEL CAUDAL ECOLÓGICO...32 | |
| TABLA 2.9 CAUDAL MÉTODO DE NAVARRO..... | 34 |
| TABLA 2.10 CAUDAL MÉTODO CAUDAL BASE..... | 36 |
| TABLA 2.11 INDICES CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES..... | 39 |
| TABLA 2.12 CAUDALES MÉTODO NGPRP..... | 40 |
| TABLA 2.13 METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS..... | 70 |
| TABLA 2.14 CONTINUACIÓN METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS..... | 71 |
| TABLA 2.15 METODOLOGÍAS HIDRÁULICAS..... | 71 |
| TABLA 2.16 METODOLOGÍAS HIDROBIOLÓGICAS..... | 72 |
| TABLA 2.17 CONTINUACIÓN METODOLOGÍAS HIDROBIOLÓGICAS..... | 73 |
| TABLA 2.18 METODOLOGÍAS HOLÍTCAS..... | 74 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 2.19 COMPARACIÓN DE LOS CUATRO TIPOS DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 75 |
| TABLA 2.20 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO..... | 76 |
| TABLA 3.1 CLASES DE VALORES DE MASIVIDAD..... | 93 |
| TABLA 3.2 COEFICIENTES DE RUGOSIDAD SEGÚN BARNES..... | 99 |
| TABLA 3.3 VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN CAUCES NATURALES..... | 101 |
| TABLA 3.4 VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD..... | 102 |
| TABLA 3.5 AUMENTO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD CONSIDERANDO LAS IRREGULARIDADES DEL CAUCE..... | 103 |
| TABLA 3.6 RANGOS CARACTERÍSTICOS DE LOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELOS..... | 107 |
| TABLA 3.7 SUPERFICIES POR CATEGORIAS DE USO DE SUELO NACIONAL..... | 110 |
| TABLA 3.8 CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE CAUCE, EN RELACIÓN CON LA SINUOSIDAD, A LA FORMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL Y LA PENDIENTE LONGITUDINAL..... | 111 |
| TABLA 3.9 CLASIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE AGUAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA PROFUNDIDAD (CAUCES DE MÁS DE 5 METROS DE ANCHURA MEDIA). SIN RIZADURAS: RÉGIMEN LAMINAR, CON RIZADURAS RÉGIMEN TURBULENTO..... | 114 |
| TABLA 3.10 GRADO DE ALTERACIÓN DE LA ORILLAS..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 3.11 CLASIFICACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIDAD DE LAS ORILLAS..... | 118 |
| TABLA 3.12 CALIDAD DE LOS BANCOS LATERALES..... | 118 |
| TABLA 3.13 DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE RACHAS SEGÚN THOM RECOMENDADO POR LA OMM..... | 124 |
| TABLA 3.14 PUNTUACIÓN DE LAS FAMILIAS DE MACRO INVERTEBRADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL BMWP..... | 138 |
| TABLA 3.15 CALIDAD DE LAS AGUAS SEGÚN BMWP..... | 138 |
| TABLA 4.1 COORDENADAS UTM RÍO JATUNHUAYCU..... | 145 |
| TABLA 4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA..... | 150 |
| TABLA 4.3 COORDENADAS DE LA RED DE ESTACIONES EN LA RESERVA ECOLÓGICA DEL ANTISANA..... | 155 |
| TABLA 4.4 CAUDALES MEDIOS MENSUALES DEL RÍO JATUNHUAYCU.. | 157 |
| TABLA 4.5 MEDIA MÓVILES MÍNIMAS DEL RÍO JATUNHUAYCU..... | 160 |
| TABLA 4.6 SERIE DE MEDIAS MÓVILES MÍNIMAS ANUALES..... | 161 |
| TABLA 4.7 ALTERNATIVAS DE CAUDALES BASE RÍO JATUNHUAYCU... | 161 |
| TABLA 5.1 CAUDALES ECOLÓGICO (m ³ /s) RÍO JATUNHUAYCU..... | 167 |
| TABLA 5.2 CAUDALES ECOLÓGICOS (m ³ /s) PARA 5 DÍAS..... | 168 |
| TABLA 5.3 CAUDALES ECOLÓGICOS (m ³ /s) OTROS MÉTODOS..... | 170 |

SIMBOLOGÍA

| | |
|--------------|---|
| Q_{min} | Caudal mínimo |
| Q_{347} | Caudal superado 347 días del año |
| Q_{ec} | Caudal ecológico |
| Q_{an} | Caudal medio anual |
| Q_{mes} | Caudal medio mensual |
| $7Q_{10}$ | 7 días con un tiempo de ocurrencia de 10 años |
| V | Velocidad |
| A | Área |
| P_2 | Precipitación media de la cuenca |
| K_c | Coeficiente de compacidad; |
| P | Perímetro de la cuenca |
| K_f | Factor de forma |
| B | Ancho medio de la cuenca |
| L | Longitud axial de la cuenca |
| la | Índice de alargamiento |
| las | Índice asimétrico |
| A_{may} | Área vertiente mayor |
| A_{men} | Área vertiente menor |
| D_d | Densidad de drenaje |
| S | Sinuosidad de las corrientes de agua |
| S_{cuenca} | Pendiente cuenca |
| S_{cauce} | Pendiente del cauce principal |
| K_m | Coeficiente de masividad |
| Co | Coeficiente orográfico |
| h | Altitud media del relieve |
| V_m | Velocidad media |
| g | Gravedad |
| y | Calado |

| | |
|-------------------|---|
| I | Pendiente |
| f | Factor de fricción |
| R | Radio hidráulico |
| η | Coefficiente de rugosidad |
| PE | Potencial de escurrimiento |
| T | Textura del suelo |
| I | Infiltración del agua en el suelo |
| Pe | Profundidad efectiva del suelo |
| D | Drenaje del suelo |
| Nf | Presencia de napa freática |
| Pcr | Valor parcial corregido; |
| Pir | Valor parcial incorrecto; |
| tcr | Pendiente del tramo correcto; y, |
| tir | Pendiente del tramo incorrecto. |
| Ni | Número de individuos por familia |
| N | Número de individuos totales |
| EPT | Índice (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) |
| BMWP | Índice (BiologicalMonitoringWorkingParty) |
| MM | Media móvil |
| fe | Factor de variabilidad |
| fe* | Factor de variabilidad atenuado |
| Qm _i | Caudal mensual |
| Qm _{min} | Caudal mensual mínimo |
| Qb | Caudal base |
| Qec | Caudal ecológico mensual |
| Qec* | Caudal ecológico mensual atenuado. |

RESUMEN

El presente estudio consiste en establecer un método para la determinación de caudales ecológicos fundamentado en la recopilación de información referente a este tema, se ha desarrollado una hoja de cálculo para el método seleccionado.

El trabajo en sus primeros capítulos inicia con la revisión de las metodologías: hidrológicas, hidráulicas, hidrobiológicas y holísticas, describiéndose de forma breve los métodos de cálculo.

En los siguientes capítulos se recopila, analiza y sistematiza los diferentes factores que intervienen en el cálculo de caudal ecológico referentes a: las variables hidrológicas (curva de duración general, características físico-geográficas de la cuenca de drenaje), variables hidráulicas (secciones transversales, velocidades, rugosidad y caudal) y la evaluación del hábitat fluvial (tipo de cuenca, uso del suelo, formas del tramo, características de la corriente, hábitat lateral, sustrato y funciones de preferencia). Posteriormente se definen los criterios y los procedimientos en campo a realizarse considerando los componentes hidrológicos, hidráulicos y biológicos.

El resultado de este análisis es una guía para la estimación de los caudales ecológicos en ríos alto andino tropicales, se propone una hoja de cálculo automatizada, desarrollada con base en el estudio realizado, con el fin de disponer de una herramienta versátil para la determinación de los caudales ecológicos.

Finalmente se realizan conclusiones y recomendaciones sobre la estimación de los caudales ecológicos.

PRESENTACIÓN

Para la determinación de los caudales ecológicos existen diferentes metodologías desarrolladas a nivel mundial, en el trabajo realizado se recoge las ventajas y desventajas que estas presentan, así como los procedimientos generales que se deben tener en cuenta al momento de realizar el cálculo. Además se presenta un breve resumen respecto al ámbito legal sobre este tema.

En el capítulo 2 se presentan las diferentes metodologías (marco teórico) para la determinación o estimación de los caudales ecológicos y nos permite evidenciar la diversidad de criterios referentes al tema y también conocer las propuestas de planificación del recurso hídrico teniendo en cuenta los caudales ecológicos.

Por otra parte en el capítulo 3 se analizan las variables físicas que intervienen en la estimación de los caudales ecológicos para luego recopilar los criterios de selección del método de cálculo.

En el capítulo 4 se propone una guía para la determinación de los caudales ecológicos recogiendo los principales criterios que intervienen en el cálculo.

Finalmente en el capítulo 5 se presenta una hoja de cálculo para la determinación del caudal ecológico de acuerdo con el método de cálculo escogido.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Los ecosistemas dulceacuícolas, a escala regional y mundial cada vez se encuentran en mayor peligro, es por esto que en las últimas décadas los científicos han acumulado pruebas considerables de que el régimen de caudales ejerce una gran influencia sobre los ecosistemas fluviales. Cada componente de un régimen de caudales desde los niveles bajos hasta las inundaciones, tienen un papel importante en la conformación del ecosistema fluvial.

Si se utiliza los recursos hídricos de un río, entonces éste tendrá menos agua lo que afecta en mayor o menor proporción la modalidad del ecosistema. El International Water Management Institute (IWMI 2005) menciona que cantidades insuficientes de agua se están quedando en las corrientes hídricas en diferentes partes del mundo y que urge a los responsables del desarrollo de las políticas, considerar la asignación de caudales como una prioridad.

La Constitución del Ecuador (2008) en el artículo 318 establece que “El Estado, será el responsable directo de la planificación de los recursos hídricos que se destinarán a consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, en este orden de prelación”.

Un criterio para la evaluación de las intervenciones humanas en un río es el caudal ecológico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El vivir en un ambiente sano y equilibrado, es un derecho consagrado en la Constitución del Ecuador, tal como estipula el Art. 14 de la sección sexta del capítulo segundo: Derechos del Buen Vivir: “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, sumakkawsay. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas...”.

En las últimas décadas la creciente demanda social de un medio ambiente más limpio ha impuesto en la planificación de los recursos hídricos la consideración de que circule en los cauces, al menos, el caudal ecológico necesario para mantener la vida no solo en el cauce sino también las condiciones ecológicamente sanas en las riveras que permitan el desarrollo de las especies de fauna y flora que en él se desenvuelven.

Las obras hidráulicas son tan abundantes en los ecosistemas fluviales que, en la actualidad, son pocos los ríos cuyos caudales no están regulados artificialmente.

Para ello la gestión del agua y de los recursos biológicos deben enfrentarse con frecuencia a la problemática que estas obras originan y en concreto cuantificar los caudales circulantes mínimos capaces de mantener los ecosistemas de los tramos de ríos regulados.

En el Ecuador, de acuerdo con el Reglamento a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, uso y Aprovechamiento del Agua expedido el 13 de abril de 2015 y de conformidad con lo regulado en el artículo 76 de la Ley, en el plazo máximo de un año tras la entrada en vigor del Reglamento se establecerán reglamentariamente los criterios, parámetros y metodologías para la determinación del caudal ecológico de acuerdo con las condiciones y características de los cuerpos de agua, que serán considerados dentro de la planificación hídrica nacional, hasta la presente fecha no existe una

metodología desarrollada en función de la realidad de nuestro país, es por esta razón la necesidad de realizar un análisis acorde con las condiciones particulares de los ríos altoandinos tomando en cuenta que respetar el valor de los ecosistemas implica dejar suficiente agua en las corrientes hídricas y que la extracción necesaria para satisfacer las necesidades humanas básicas debe estar condicionada por la disponibilidad en la fuente.

Por todo lo expuesto anteriormente es importante realizar un estudio más detallado sobre los criterios y metodologías para el cálculo del caudal ecológico en los ríos altoandinos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer criterios para la determinación del caudal ecológico en ríos altoandinos tropicales.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las metodologías existentes para la determinación del caudal ecológico.
- Proponer una guía para la determinación del caudal ecológico en ríos altoandinos tropicales.
- Presentar una aplicación informática del cálculo del caudal ecológico con la metodología adoptada.

1.4 MARCO LEGAL

La Constitución del Ecuador de 2008, considera tres premisas para el manejo del recurso agua en el país. La primera caracteriza al agua como un elemento vital para la naturaleza y las personas y sobre la cual tenemos derecho efectivo de goce. La segunda determina que la gestión del agua será pública o comunitaria, impidiendo sistemas alternativos privados. La tercera premisa

tiene una importancia capital, puesto que posiciona al caudal ecológico en el tercer puesto en la prelación de asignación de caudales, anteponiendo -en buena lógica- la seguridad alimentaria y el consumo humano consuetudinario.

1.4.1 LEY DE RECURSOS HÍDRICOS, USO Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA.

Se destacan los artículos más relevantes en materia de caudales ecológicos.

Artículo 76.- Caudal ecológico. Para los efectos de esta Ley, caudal ecológico es la cantidad de agua, expresada en términos de magnitud, duración, época y frecuencia del caudal específico y la calidad de agua expresada en términos de rango, frecuencia y duración de la concentración de parámetros que se requieren para mantener un nivel adecuado de salud en el ecosistema.

La Autoridad Única del Agua en coordinación con la Autoridad Ambiental Nacional establecerá reglamentariamente los criterios, parámetros y metodologías para la determinación del caudal ecológico de acuerdo con las condiciones y las características de los cuerpos de agua, que serán considerados dentro de la planificación hídrica nacional.

Toda resolución de la Autoridad Única del Agua por la que se otorgue autorización para uso o aprovechamiento productivo del agua deberá establecer y considerar el caudal ecológico que fue determinado para ello, conforme con los criterios de la planificación hídrica nacional.

Artículo 77.- Limitaciones y responsabilidades. El caudal ecológico de los cursos permanentes de agua en toda cuenca hidrográfica es intangible.

Es responsabilidad de la Autoridad Única del Agua, de las instituciones y de todas las personas, sean usuarios o no del agua, el respetar la cantidad y calidad requerida que proteja la biodiversidad acuática y los ecosistemas aledaños.

Todas las actividades productivas respetarán el caudal ecológico.

El caudal ecológico definido no es susceptible de autorización para su uso o aprovechamiento productivo, a excepción de aquellos usos que no tenga como consecuencia la afectación en la calidad ni en cantidad del caudal ecológico.

La autoridad administrativa que contravenga esta disposición, será responsable por los daños ambientales que genere y por el pago de la indemnización por daños y perjuicios ocasionados a terceros afectados o al patrimonio natural del Estado; además será sancionado de conformidad con la Ley, sin perjuicio de la nulidad de la autorización concedida.

Únicamente en el caso de declaración de estado de excepción, podrá autorizarse el uso del caudal ecológico para consumo humano, hasta tanto se adopten las medidas emergentes para garantizar nuevamente el abastecimiento.

1.4.1.2 Reglamento a la Ley de Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (RLORH).

El RLORH fue expedido 31 de marzo de 2015 y establece las siguientes disposiciones para el caudal ecológico:

Artículo 83.- Clases de usos. Soberanía Alimentaria.- De acuerdo con lo previsto en el artículo 318 de la Constitución, el recurso hídrico se destinará para: consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas.

La Disposición Transitoria Sexta establece que de conformidad con lo regulado en el artículo 76 de la Ley, en el plazo máximo de un año tras la entrada en vigor del Reglamento, la Secretaria del Agua, en coordinación con la Autoridad Ambiental Nacional establecerá reglamentariamente los criterios, parámetros y metodologías para la determinación del caudal ecológico de acuerdo con las

condiciones y las características de los cuerpos de agua, que serán considerados dentro de la planificación hídrica nacional.

En tanto no tenga lugar la aprobación de dicha reglamentación, la Secretaría del Agua establecerá, como caudal ecológico al 10% del caudal medio mensual multianual del régimen natural de la fuente, determinado en función de los datos hidrológicos de al menos 10 años.

1.5 DEFINICIONES BÁSICAS

Abiótico.- Que carece de vida. En el ecosistema se denomina así a aquellos componentes que no tienen vida.

Acuífero.- Es una capa de agua que se almacena y transmite es un estrato rocoso permeable de la litósfera de la Tierra, saturando sus poros o grietas y que puede extraerse en cantidades económicamente aprovechables.

Altoandino.- Zona cubierta de musgo, colchón pobre y muchas otras plantas que funcionan como esponjas y absorben y acumulan grandes cantidades de agua que dan origen a riachuelos, quebradas y ríos que descienden a las zonas bajas. Se denomina bosque andino, bosque nuboso o bosque de niebla, a los ecosistemas de bosque y selvas montana de la Cordillera de los Andes, especialmente a los situados en los Andes septentrionales y que son propios de Colombia, Venezuela, Ecuador y una parte de Perú los cuales son llamados bosques montañosos de los Andes del Norte por el Fondo Mundial para la Naturaleza.

Aluviales.- Son suelos de origen fluvial, poco evolucionados aunque profundos. Aparecen en las vegas de los principales ríos. Se incluye dentro de los fluviosolescalcáricos y eútricos, así como antesoiles áridos y cumúlicos, si la superficie presenta elevación por aporte antrópico, o si han sido sometidos a cultivos profundos de materiales transportados por corrientes de agua. Sobre

su superficie se ha acumulado algo de materia orgánica. Son suelos que tienen mala filtración y oscuros. Son suelos recientes, buenos para cultivar.

Batimetría.- Conjunto de técnicas para la medición de las profundidades en un río.

Bentos.- Es la comunidad formada por los organismos que habitan en el fondo de los ecosistemas acuáticos. El bentos se distingue del plancton y del necton, formados por organismos que habitan en la columna de agua.

Biodiversidad.- Variabilidad de los organismos vivos en cualquier ecosistema, dentro de cada especie, entre las especies y los complejos ecológicos que forman parte.

Biomasa.- es la cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o un ecosistema.

Biota.- Conjunto de especies de plantas, animales y otros organismos que ocupan un área dada. El término biótico puede desglosarse en flora y fauna, según los límites establecidos en Botánica y en Zoología.

Biotopo.- Palabra referida al concepto de hábitat como prerequisite, la existencia de un organismo, que han ido evolucionando a través del tiempo por medio de distintos factores ambientales, tales como: agua, suelo, rasgos geográficos y fenómenos climáticos y con esto se demuestra las diferentes evoluciones y cambios de los ecosistemas existentes en el planeta.

Biótico.- Todo lo viviente. Una asociación biótica comprende las plantas y animales presentes en un área determinada.

Calado.- Es la medida desde la profundidad del lecho río hasta la superficie libre del agua.

Caudal.- Volumen de agua que arrastra una corriente de agua.

Caudal ambiental.- Cantidad mínima de agua que asegure la subsistencia del ecosistema con las necesidades humanas.

Caudal ecológico.- Cantidad de agua suficiente que circula en el cauce en condiciones óptimas, que permitan el desenvolvimiento natural de la vida bioacuática y los ecosistemas aledaños.

Ciclo hidrológico.- Secuencias cíclicas de las distintas fases por las que pasa el agua siendo las principales: precipitación, escurrimiento y evaporación.

Componentes del ecosistema.-Partes constituidas de un sistema biológico. Se agrupan en componentes estructurales (substancias químicas, energía y organismos) y funcionales (flujo de energía, ciclos de nutrientes y cadenas alimenticias).

Cuenca hidrográfica.- Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, drenando sus agua hacia el mar a través de un único río, vertiendo sus aguas a un único lugar de desembocadura, se encuentran generalmente delimitada por una línea de cumbres comúnmente llamada divisoria de aguas.

Curva de duración general.- Es una gráfica que sirve para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado.

Descarga.- Ingreso de líquidos a distintos cuerpos receptores.

Desviación típica o desviación estándar.- Es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable, (denotada con el símbolo σ o s , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos). Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos

más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

Ecosistema acuáticos.- Son todos aquellos ecosistemas que tiene por biotopo algún cuerpo de agua, como puede ser: océanos, mares, ríos, lagos, pantanos, riachuelos y lagunas entre otros. También se encuentran los ecosistemas marinos y los ecosistemas de agua dulce.

Flujo laminar.- Movimiento de un fluido de manera ordenada, estratificada y suave. Se caracteriza porque el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula sigue una trayectoria suave llamada línea de corriente.

Flujo turbulento.- Movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en la cual las partículas se mueven desordenadamente, donde sus trayectorias se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos (no coordinados), como por ejemplo el agua de un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta etapa, donde después de esto su trayectoria es impredecible.

Fluvial.- Se utiliza en geografía y en las ciencias de la Tierra para referirse a los procesos asociados a los ríos, arroyos, a los depósitos y relieves creados por ellos.

Freático.- Se aplica al agua que está bajo tierra acumulada sobre una capa de tierra impermeable: las aguas freáticas se pueden aprovechar construyendo pozos.

Freza o desove.- Es el acto de verter los huevos y esperma de los peces y anfibios en su ambiente. Es también la nube de huevos que resulta de lo anterior. La mayoría de los animales acuáticos, que no son mamíferos acuáticos se reproducen mediante el proceso de freza. El proceso de freza generalmente comprende la liberación de óvulos (huevos no fertilizados) en el

agua por parte de las hembras, a menudo en grandes cantidades, mientras simultáneamente o secuencialmente los machos liberan los espermatozoides (lecha) para fertilizar los huevos.

Gradiente.- Medida de la inclinación de una curva (con frecuencia línea recta). Se define como la relación del cambio vertical (elevación) con respecto al cambio horizontal (recorrido).

Hábitat.- Conjunto de condiciones ambientales en las que vive una especie o un individuo.

Hidrología.- Ciencia geográfica que se dedica al estudio de la distribución, espacial, temporal y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración, entre otros.

Hidráulico: Es una rama de la física y la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa (fuerza) y empuje de la misma.

Holístico.- Es aquello perteneciente al holismo, una tendencia o corriente que analiza los eventos desde el punto de vista de las múltiples interacciones que los caracterizan. El holismo supone que todas las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas o explicadas como la suma de sus componentes. Es decir es la tendencia de usar una evolución creativa para formar un todo que es mayor que la suma de sus partes.

Macro invertebrados.- Son individuos de agua dulce. Existen varias definiciones acerca del punto de vista en el cuál los macro invertebrados se separan de los micro invertebrados, en términos generales se acepta un tamaño de 0.5 mm o superior para los macro invertebrados.

Meandro.- Es una curva descrita por el curso del río cuya sinuosidad es pronunciada. Se forman con mayor facilidad en los ríos de las llanuras aluviales

con pendiente muy escasa, dado que los sedimentos suelen depositarse en la parte convexa del meandro, mientras que en la cóncava, debido a la fuerza centrífuga, predomina la erosión y retroceso de la orilla.

Mediana.- Representa el valor de las variables de posición central en un conjunto de datos ordenados.

Media móvil.- Es un cálculo utilizado para analizar el conjunto de datos en modo de puntos para crear series de promedios. Así las medias móviles son una lista de números en el cual cada uno es el promedio de un subconjunto de datos originales.

Percentil.- Es una medida usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variables por debajo del cual se encuentran un porcentaje dado de observaciones en un grupo de datos. Por ejemplo, el percentil 20° es el valor debajo del cual se encuentra el 20 por ciento de las observaciones.

Perímetro mojado.- Se define como la suma de la longitud de los límites de la sección que realmente están en contacto con (es decir, mojados por) el fluido.

Sedimento.- Es el material sólido acumulado sobre la superficie terrestre (litósfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrósfera y en la biosfera (vientos, variaciones de temperatura, precipitaciones, circulación de aguas superficiales o subterráneas, desplazamientos de masas de aguas en el ambiente marino o lacustre, acciones de agentes químicos y acciones de organismos vivos.

Simulación hidráulica.- Es la experimentación con un modelo que imita ciertos aspectos de la realidad. Permite trabajar en condiciones similares a las reales, pero con variables controladas y en un entorno que se asemeja al real pero está creado o acondicionado artificialmente.

Taxón.- Es un grupo de organismos emparentados, que en una clasificación dada han sido agrupados, asignándole al grupo un nombre en latín, una descripción si es una especie y un tipo. Cada descripción formal de un taxón es asociada al nombre del autor o autores que la realizan.

Transecto.- Sección transversal de un río.

Velocidad de flujo.- Velocidad a presentarse en el curso natural de un río.

CAPÍTULO 2

SINTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica sobre los conceptos, metodologías y métodos para determinar los caudales ecológicos.

2.1 ANÁLISIS DE LA LITERATURA TÉCNICA PARA LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.

Los ríos no son sólo conductos de los cuales se extrae lo que se necesita y se desecha lo que no, estos nos brindan servicios imprescindibles a los seres humanos y a los ecosistemas asociados. En la actualidad la fuerte presión sobre los mismos ha alterado su régimen natural y limita los bienes y servicios provistos por los sistemas de agua dulce.

Para la determinación del caudal ecológico es necesario avanzar en el conocimiento de los ecosistemas, conocer los derechos de uso del agua (fortalecer la gobernanza del agua) para establecer acuerdos entre los usuarios, así como mejorar las acciones de monitoreo y vigilancia.

Para asegurar prácticas sostenibles y responsables en el mundo se están aplicando técnicas estimación del régimen de caudales ecológicos. Es así como en muchos países se trabaja constantemente en establecer o tener mayor proximidad sobre los caudales que deben permanecer en el río después de un aprovechamiento, estos se definen bajo varios parámetros y de acuerdo con los componentes hidráulicos, hidrológicos y ecológicos.

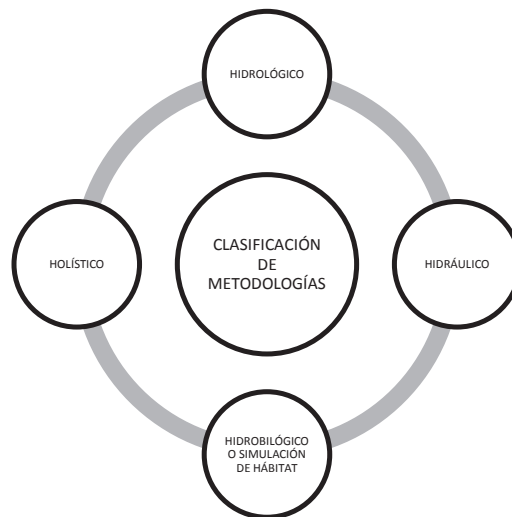
2.2 METODOLOGÍAS

Desde 1970, principalmente en Estados Unidos, Europa, Sudáfrica y Australia, existe una evolución en las metodologías para valorar los requerimientos de caudales ecológicos de los ecosistemas fluviales. Tradicionalmente se desarrollaron metodologías donde se encontraban los caudales necesarios para el mantenimiento de la población, hábitat y actividades de especies objeto pero actualmente el campo se ha expandido e incluye la valoración de otras necesidades de la diversidad biótica y aspectos de la estructura del ecosistema (Castro, Carvajal, y Monsalve, 2006, pp 8-13).

2.3 CLASIFICACIÓN REBECCA THARME

Durante el año 2003, Rebecca Tharme escribió un artículo “A global perspective on environmental flow assessment”, el cual ha sido altamente aceptado y utilizado como una fuente básica en las investigaciones que se han desarrollado sobre caudales ecológicos desde su publicación citado en (Tilano, 2011). Se propone la siguiente división como se muestra en la Figura 2.1:

FIGURA 2.1
CLASIFICACIÓN REBECCA THARME



FUENTE: Tharme, 2003

Las metodologías para determinar el caudal ecológico son variadas –más de 200-, requieren de diferente tipo de información y bases teóricas, varían desde trabajo de escritorio (procedimientos hidrológicos) hasta la obtención de información para la utilización de software especializado que vincula datos hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos, sociales, biológicos, etc..

2.3.1 METODOLOGÍA HIDROLÓGICA

Las metodologías hidrológicas constituyen las primeras propuestas para la estimación de caudales ecológicos y fueron desarrolladas principalmente en Estados Unidos durante los setenta y ochentas. Constituyen la mayor parte de los métodos registrados siendo aproximadamente el 30% de todos las que han sido utilizados, con un total de 61 técnicas o índices aplicadas hasta la fecha (Tharme, 2003, p. 401).

Esta metodología se basan en registros o reseñas hitóricas de los cuerpos acuáticos, estos pueden ser diarios, mensuales o anuales, que son los que van a suministrar la información para realizar la aplicación que dará como resultado el caudal recomendable para preservar los ecosistemas (Bragg, Black, Duck, y Rowan, 2005, pp. 512-515).

Son consideradas como versátiles, “dado que son aplicables a distintas escalas desde la planificación hidrológica hasta la de tramos de ríos concretos” (Palau, 2003, p. 65).

Entre los métodos hidrológicos más utilizados se encuentran:

2.3.1.1 Método de Tennant (1976)

Es uno de los métodos más usados mundialmente en corrientes que no tienen estructuras de regulación como represas, diques u otras modificaciones en el cauce (Arthington y Zalucki, 1998, p. 9).

Tennant en 1976 desarrolló este método basado en diez años de observaciones y mediciones de carácter fundamentalmente biológico para una especie en particular (la trucha) en once ríos de Montana (Wyooming y Nebraska en los Estados Unidos), encontrando relaciones entre los parámetros físicos del cauce (ancho, profundidad y velocidad del cauce) y la disponibilidad del hábitat para una especie en particular.

El método divide el año en dos períodos, en cada uno de los cuales se recomiendan unos porcentajes del caudal medio interanual para lograr una calidad de hábitat fluvial determinada.

Las recomendaciones de caudal según Tennant (1976) para las dos épocas del año aparecen en la tabla 2.1.

TABLA 2.1
RECOMENDACIONES DE CAUDAL SEGÚN TENNANT (1976)

| CATEGORIA DEL CAUDAL | RECOMENDACIONES DEL RÉGIMEN DE CAUDAL BASE | | OBSERVACIONES |
|-------------------------------------|--|--------------------|--|
| | Qec (%) | | |
| | Octubre a Marzo | Abril a Septiembre | |
| Abundante/ Máximo | 200 | 200 | Valores mayores pueden causar severos procesos de erosión de riberas y degradación del ecosistema acuático |
| Rango óptimo | 60 - 100 | 60 - 100 | Particularmente para los primeros estadios de desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos y para la mayoría de usos recreativos |
| Excepcional/ Excelente | 40 | 60 | |
| Excelente/Muy Bueno | 30 | 50 | Caudal recomendado para mantener los hábitats y vida acuática |
| Bueno | 20 | 40 | |
| Degradación/ Aceptable | 10 | 30 | |
| Pobre o mínimo/Débil | 10 | 10 | Mínimo: permite proteger temporalmente algunos hábitats para los organismos acuáticos |
| Degradación severa/Muy insuficiente | < 10 | < 10 | Severa degradación para la mayoría de los elementos del medio acuático |

FUENTE: Mayo 2000, p. 38

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

Tennant (1976) observó que la anchura de la lámina de agua, profundidad y velocidad del agua variaban en mayor medida al modificar el caudal circulante entre los valores de 0% y 10% del caudal medio (Q_m) que en cualquier otro rango de variación de caudal, y que como media, el 10% del Q_m cubría aproximadamente el 60% del máximo perímetro mojado. También observó que un caudal equivalente al 10% del Q_m proporcionaba profundidades y velocidades medias de 0.3 m/s y 0.23 m/s respectivamente, valores que consideraba estaban al límite de lo aceptable basándose en otros estudios realizados. También concluyó que un 30% del Q_m creaba un hábitat suficiente para la supervivencia de la mayoría de las formas de vida acuática, ya que proporcionaba anchuras, profundidades y velocidades satisfactorias, y por otro lado la mayoría de las zonas poco profundas (rápidos y orillas arenosas) quedaban cubiertas con suficiente agua para que los peces adultos pudieran moverse en ellas. Para caudales que representaban el 60% del Q_m Tennant (1976) esperaba que la mayoría del cauce estuviera cubierto con agua incluyendo las zonas poco profundas, y la mayoría de la ribera serviría como refugio para los peces. Así, Tennant concluyó que el 60% del Q_m proporcionaba condiciones de hábitat excelentes.

Este método implica determinar para un registro multianual de caudales medios mensuales, el caudal promedio y de éste se establece un porcentaje que deberá ser respetado en la corriente de acuerdo al estado deseado. Para una mayor comprensión del método es necesario realizar gráficas donde se muestra la variación intranual de los caudales, a partir del cual se establece un período de caudales máximos o húmedos y uno de caudales de estiaje o seco.

2.3.1.2 Método de Hoppe (1975)

Este método fue uno de los primeros en desarrollarse y trabaja con la curva de caudales clasificados estableciendo porcentajes fijos según tres objetivos:

avenidas (recomendado para limpiar el cauce), para mantener las condiciones del hábitat (convenientes para el desolve) y para mantener las condiciones de alimento y abrigo (Gordon, McMahon, y Finlayson, 1992, p 526; Castro et al, 2006, p. 12).

Es la relación entre los percentiles de la Curva de Duración de Caudales (CDC) y las condiciones favorables de la biota. Se construye la CDC a partir de una serie de registro de caudales para definir los mínimos asociados a los diferentes estadios de crecimiento como se muestra en la Tabla 2.2.

TABLA 2.2
CAUDAL SEGÚN HOPPE

| TIPO DE CAUDALES | CAUDAL |
|----------------------|-----------------|
| Lavado | Q ₁₇ |
| Freza - desove | Q ₄₀ |
| Producción y refugio | Q ₈₀ |

FUENTE: Castro et al 2006, p. 13

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

2.3.1.3 Método de Porcentajes Fijos (1980)

Este método considera un porcentaje fijo (a lo largo de todo el año) del caudal medio interanual o módulo obtenido de una serie suficientemente significativa de datos se aforo. La Dirección General de Obras hidráulicas (1980) para cauces españoles ha fijado un 10% como caudal mínimo permanente. Mientras que la Ley Francesa establece un caudal mínimo igual a 10% del módulo, tomando como mínimo un periodo de 5 años. Para módulos superiores a 80m³/s (Decreto Consejo de Estado, Francia 2006) podrá rebajarse el caudal mínimo a un máximo del 5% del módulo. Esta Ley también considera algunos aspectos bióticos, como que el caudal mínimo debe ser suficiente para la conservación de la vida, el movimiento y reproducción de las especies que pueblan las aguas (Mayo, 2000, p. 35; Castro, Carvajal, y Monsalve, 2006, p. 8).

2.3.1.4 Método de Matthey (1993)

Este método calcula el caudal mínimo a partir del caudal que circula al menos durante trescientos días al año (Q_{300} : caudal superado en 300 días del año, obtenido a partir de la curva de caudales clasificados). La curva de caudales clasificados representa los 365 caudales diarios ordenados de mayor a menor (Mayo, 2000, p. 12). A partir de estos caudales se aplican las siguientes fórmulas:

$$Q_{\min} = \frac{(15 \cdot Q_{300})}{(\ln Q_{300})^2} \quad (2.1)$$

$$Q_{\min} = 0,25 \cdot Q_{300} + 75 \quad (2.2)$$

$$Q_{\min} = 0,20 \cdot Q_{300} \quad (2.3)$$

Donde:

Q_{\min} = caudal mínimo

Q_{300} = caudal superado en 300 días

Posteriormente se sustituyó Q_{300} por Q_{347} ya que en las fórmulas originales los caudales resultantes eran muy altos. Con Q_{300} se tienen caudales conservadores se dejan fuera los caudales más bajos correspondientes a la parte de la época de estiaje. Al utilizar Q_{347} se obtienen valores de caudal muy bajos (ya que hay que tener en cuenta que caudales inferiores al Q_{347} solo se producen 18 días al año).

2.3.1.5 Legislación de Suiza (1993)

Propone algoritmos constituidos por un caudal mínimo base y un caudal complementario variable en función del Q_{347} (caudal superado 347 días del año), además hace una diferencia para encontrar el caudal mínimo, si éste es para aguas piscícolas o no piscícolas como se indica en la tabla 2.3 (Mayo, 2000, p. 13).

Exigencias para todas las aguas:

$$Q_{\min} > 50 \text{ l/s} \quad (2.4)$$

$$\text{Si } Q_{347} < 1000 \text{ l/s, } Q_{\min} \geq 0,35 * Q_{347} \quad (2.5)$$

Donde: Q_{\min} = caudal mínimo

Q_{347} = caudal superado 347 días del año

Para aguas no piscícolas y piscícolas se hace una distinción en función del Q_{347} :

TABLA 2.3
CAUDAL MÉTODO SUIZO

| AGUAS NO PISCICOLAS | AGUAS PISCICOLAS | | |
|---|------------------|-------------|-------------------------------|
| | Q_{347} (l/s) | Q min (l/s) | Caudal adicional |
| 50 (l/s) o el 35% del Q_{347} si y solo si $Q_{347} < 1 \text{ m}^3/\text{s}$ | >60 | 50 | 8 (l/s) por cada 10 (l/s) |
| | >160 | 130 | 4,4 (l/s) por cada 10 (l/s) |
| | >560 | 280 | 31 (l/s) por cada 100 (l/s) |
| | >2500 | 900 | 21,3 (l/s) por cada 10 (l/s) |
| | >10000 | 2500 | 150 (l/s) por cada 1000 (l/s) |
| | >60000 | 10000 | 0 |

FUENTE : Mayo 2000, p. 13

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

Para calcular el valor de Q_{347} se propone la siguiente ecuación:

$$Q_{347} = \frac{(a_0 * Q_{an})}{10} \quad (2.6)$$

Donde:

Q_{an} = caudal medio anual

a_0 = un coeficiente que toma los valores de 0,5; 1; 1,5 y 1,8.

Este método utiliza fórmulas empíricas para la cuantificación del caudal mínimo, pero con premisas de carácter cualitativo (Mayo, 2000, p.13):

- El caudal mínimo debe permitir el mantenimiento de la calidad de las aguas superficiales, contando con los vertidos de aguas utilizadas y los existentes en los planes futuros.
- Se deben mantener los niveles de los acuíferos subterráneos, de manera que no se vean perjudicados ni la vegetación ni los usos de agua potable actuales y previstos en el futuro.
- Se deben conservar los biotopos y biocenosis raras y los lugares de esparcimiento particularmente bellos, cuyo aspecto y estética ambiental dependan de la cantidad de agua circulante. Para no entorpecer el movimiento de los peces migratorios y si el caudal es superior a 50 l/s, es obligatorio mantener una profundidad de al menos 20 cm en el cauce.

2.3.1.6 Legislación de Francesa (2006)

La Ley N° 2006-1772 del 30 de Diciembre de 2006 - art. 6 JORF 31 Diciembre 2006, establece como caudal mínimo el 10% del caudal medio interanual calculado para un período mínimo de 5 años. Este caudal debe garantizar la conservación de la vida el movimiento y la reproducción de las especies que pueblan las aguas en el momento de la instalación de la obra.

Se establece la siguiente fórmula para el cálculo del caudal:

$$Q_{ec} = \left(\frac{1}{10}\right) * Q_{an} \quad (2.7)$$

Donde:

Q_{an} = caudal medio anual

Q_{ec} = caudal ecológico

Se establecen las siguientes excepciones:

- Si $Q_{ec} > Q$ aguas arriba de la obra, se deja el Q aguas arriba.
- Para $Q_{an} \geq 80 \text{ m}^3/\text{s}$, mediante decreto podrá rebajarse hasta $(1/20) * Q_{an}$.

2.3.1.7 Legislación Asturiana

Esta legislación, se fundamenta en la legislación Suiza y define el caudal ecológico como el mayor valor de caudal dado por las siguientes fórmula que se ingresan y se expresan en (l/s).

- Nivel (I) Zonas de truchas será el caudal mayor aplicando las siguientes fórmulas:

$$Q_{ec} = 50 \quad (2.8)$$

$$Q_{ec} = \frac{15 * Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2} \quad (2.9)$$

$$Q_{ec} = 0,35 * Q_{347} \quad (2.10)$$

$$Q_{ec} = 0,25 * Q_{347} + 75 \quad (2.11)$$

Donde

Q_{347} = caudal superado 347 días del año

- Nivel (II) Zonas interés piscícola, nivel de protección medio II: Nivel I + 2 l/s/km² de cuenca aprovechable.
- (Nivel III) Zonas salmoneras nivel de protección máximo III: Max (Nivel I, Nivel II) + 4l/s/km² de cuenca aprovechable.

En el caso de no contar con información de caudales medios diarios el Q_{347} se calcula a partir de la fórmula (2.6) de este capítulo.

2.3.1.8 Método de Tessman (1976)

Este método es la modificación del método de Montana, es conocido como el método de Tennant modificado. Se calcula los caudales mínimos comparando un porcentaje determinado del caudal medio interanual (Q_{an}) con el caudal medio mensual (Q_{mes}). Pueden utilizarse caudales diarios o mensuales, en este último caso los valores finales obtenidos son algo más altos (Mayo, 2000, p. 15).

El caudal mínimo del mes es aquel que satisface una de las siguientes ecuaciones:

- Si $0,4 * Q_{an} > Q_{mes}$ el caudal mínimo recomendado es Q_{mes} . (2.12)
- Si $0,4 * Q_{an} < 0,4 Q_{mes}$ el caudal mínimo recomendado es $0,4 Q_{mes}$. (2.13)
- De no cumplirse ninguna de las desigualdades anteriores el caudal mínimo recomendado es $0,4 Q_{an}$. (2.14)

Donde:

Q_{an} = caudal medio anual

Q_{mes} = caudal medio mensual

2.3.1.9 Método de Montana (1976)

Considera sólo tres caudales obtenidos del módulo interanual Q_{an} :

- Caudal mínimo = $0,1 * Q_{an}$ como un mínimo absoluto
- Caudal bueno = $0,3 * Q_{an}$, considerando como el caudal que proporciona hábitat suficiente para la mayoría de las especies acuáticas presentes en el tramo.
- Caudal excelente = $0,6 * Q_{an}$, considerando como el caudal que proporciona hábitat suficiente y satisface además otros usos recreativos del cauce.

2.3.1.10 Método de Arkansas (1987)

Este método divide al año en tres épocas de acuerdo a la siguiente tabla:

TABLA 2.4
CAUDAL MÉTODO DE ARKANSAS

| EPOCA | MESES | CAUDAL MEDIO MENSUAL |
|--------------|-----------------|----------------------|
| Aguas Bajas | Julio/Octubre | 50 % Q_{mes} |
| Aguas Altas | Noviembre/Marzo | 60 % Q_{mes} |
| Desove/Freza | Abril/Junio | 70 % Q_{mes} |

FUENTE: Mayo 2000, p.16

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

Para la época de desove según el lugar de aplicación y las especies existentes esta época debe ser modificada.

2.3.1.11 Método de Texas (1979).

Fue desarrollado por el Servicio de Vida Salvaje y Parques de Texas y propone el cálculo del caudal mínimo como un porcentaje de la mediana de los caudales medios mensuales de acuerdo a las siguientes características de la tabla y se obtiene un régimen con carácter mensual.

TABLA 2.5
CAUDAL MÉTODO DE TEXAS

| EPOCA | MESES | CAUDAL MEDIO MENSUAL |
|--------|-------------------|----------------------|
| Húmeda | Noviembre/Febrero | 40 % Q_{mes} |
| Seca | Marzo/Octubre | 60 % Q_{mes} |

FUENTE: Mayo 2000, p.13

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

2.3.1.12 Método de Aproximación por Rangos de Variabilidad (Range of Variability Approach – RVA, 1996).

El objetivo fundamental de este método, es la conservación de la biodiversidad acuática en condiciones naturales y protección del ecosistema. Se basa en el análisis de una serie de caudales (diarios), utilizando un número suficiente de observaciones, es decir de largos períodos de tiempo donde se describe las variabilidad hidrológica antes y después de instalada una represa, de tal manera que se pueda considerar que los datos utilizados no son sesgados por actuaciones humanas posteriores. Se recomienda que se usen 20 años de datos de registros diarios para cada período anterior al impacto y posterior al impacto, así como para el análisis de tendencias. Esto se basa en (Richter, Baumgartner, Wignington, y Braun, 1997, p. 231-249), quienes encontraron que para tres tipos de corrientes diferentes en Estados Unidos, las mediciones de la tendencia central o la dispersión de los caudales máximos que ocurren en un día en el correr de los años convergen en torno a la media de largo plazo cuando se usan datos de por lo menos 20 años.

El número de datos necesarios pueden variar dependiendo de:

- El grado de variabilidad climática
- La frecuencia o variabilidad del parámetro en particular

- En la severidad de las alteración hidrológica que está tratando de detectar; y,
- Si la meta es caracterizar la tendencia central o el rango de variabilidad interanual.

Consiste en tener una descripción del flujo natural a través de 33 parámetros que fueron considerados y definidos por (Richter, Baumgartner, Powel, y Braun, 1996, p. 1163-1174) como claves en el funcionamiento del ecosistema para luego, estimar un rango de variación máximo de esos parámetros. Con este método se recomienda un sistema de manejo con objetivos anuales intentando emular o “imitar” las características del flujo natural después del funcionamiento de la represa o hidroeléctrica. Esta metodología es adaptativa y depende el monitoreo continuo para la redefinición de sus objetivos.

Este método considera un régimen de caudales mínimos, es decir no se considera un valor constante durante todo el año, sino variable de manera mensual como se muestra en la figura 2.2.

FIGURA 2.2
ESQUEMA DE CÁLCULO DEL RVA

| | | | |
|-----------------|------|----------------------|--------------|
| Q medio mensual | | | |
| Año 1 | Año | Percentil 5 | Percentil 10 |
| Qm 1 | Qm 1 | Mes 1 | Mes 1 |
| · | · | · | · |
| · | · | · | · |
| Qm | Qm | Mes 12 | Mes 12 |
| | | Mínimo Seco | |
| | | Mínimo Húmedo | |

FUENTE: Hernández, Ferrer, Peris, Hernández, y Bargay, 2008, p. 52

El principal objetivo de este método consiste en definir políticas de gestión a partir de 33 indicadores relacionados con la corriente, llamados Indicadores de Alteración Hidrológica (Indicators of Hydrologic Alteration - IHA) y componentes del caudal ecológico.

Los IHA identifican las componentes del régimen natural de caudales en magnitud, frecuencia, periodicidad y duración (Richter et al., 1997, p. 231-249), y con ellos se hacen recomendaciones del rango en el cual pueden variar sin perjudicar al ecosistema fluvial.

En la tabla 2.6 se muestra los índices de alteración hidrológica considerados para el cálculo del régimen de caudales con el método RVA.

En la tabla 2.7 se muestra el resumen de los parámetros de los indicadores de alteración hidrológica y sus influencias con el ecosistema.

TABLA 2.6
INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA

| GRUPO DE PARÁMETROS IHA | PARÁMETROS HIDROLÓGICOS | CÁLCULO |
|---|-------------------------|---|
| Magnitud de las condiciones mensuales | 12 | Media o mediana de cada mes calendario |
| Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales | 12 | Mínimo anual promedio de 1 día |
| | | Mínimo anual promedio de 3 días |
| | | Mínimo anual promedio de 7 días |
| | | Mínimo anual promedio de 30 días |
| | | Mínimo anual promedio de 90 días |
| | | Máximo anual promedio de 1 día |
| | | Máximo anual promedio de 3 día |
| | | Máximo anual promedio de 7 día |
| | | Máximo anual promedio de 30 día |
| | | Máximo anual promedio de 90 día |
| | | Cantidad de días con caudal cero |
| Índice del flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual. | | |
| Duración de las condiciones extremas anuales | 2 | Día Juliano del máximo - 1 día |
| | | Día Juliano del mínimo - 1 día |
| Frecuencia y duración de impulsos altos/bajos | 4 | Número de impulsos bajos anuales |
| | | Duración promedio de los impulsos bajos días |
| | | Número de impulsos altos anuales |
| | | Duración promedio de los impulsos altos días |
| Rango / frecuencia de los cambios en la condición del agua | 3 | Tasas de ascensos: media o mediana de todas las diferencias positivas entre los valores diarios consecutivos. |
| | | Tasas de ascensos: media o mediana de todas las diferencias negativas entre los valores diarios consecutivos. |
| | | Cantidad de inversiones hidrológicas |

FUENTE: The Nature Conservancy 2009, pp. 8-10

TABLA 2.7
INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INFLUENCIA DEL ECOSISTEMA

| GRUPO DE PARÁMETROS IHA | INFLUENCIAS DEL ECOSISTEMA |
|--|--|
| Magnitud de las condiciones mensuales | Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos |
| | Disponibilidad de la humedad del suelo para las plantas. |
| | Disponibilidad de agua para los animales terrestres. |
| | Disponibilidad de alimentos/cobertura para mamíferos con pelo. |
| | Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres |
| | Acceso de los depredadores a los sitios de anidación |
| | Influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua |
| Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales | Equilibrio de organismos competitivos, ruderales y tolerantes a las presiones |
| | Creación de sitios para la colonización de plantas |
| | Estructuración de los ecosistemas acuáticos para factores abióticos vs bióticos |
| | Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat |
| | Estrés de la humedad del suelo en las plantas |
| | Deshidratación en los animales |
| | Estrés anaeróbico en las plantas |
| | Volumen del intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación |
| | Duración de las condiciones de presión tales que bajo nivel de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos |
| | Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación |
| Duración de las condiciones extremas anuales | Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos |
| | Predictibilidad/evitabilidad del estrés de los organismos |
| | Acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación |
| | Indicios para el desove de los peces migratorios |
| | Evolución de las estrategias de los ciclos biológicos, mecanismos de comportamiento |
| Frecuencia y duración de impulsos altos/bajos | Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas |
| | Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas |
| | Disponibilidad del hábitat en las planicies de inundación organismos acuáticos |
| | Intercambio de nutrientes y de materia orgánica en el río y las planicies de inundación |
| | Disponibilidad de minerales del suelo |
| | Acceso a sitios de alimentación descanso y reproducción para la aves acuáticas |
| | Influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos) |
| Rango / frecuencia de los cambios en la condición del agua | Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes) |
| | Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes) |
| | Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente (varial zone) |

FUENTE: The Nature Conservancy 2009, pp. 8-10

Así también el IHA calcula parámetros para 5 tipos diferentes del componente del caudal ecológico: caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas y grandes inundaciones (The Nature Conservancy, 2009, p. 10).

Caudales bajos: es una condición de caudal dominante en la mayoría de los ríos. Estos niveles de caudal bajo se mantienen por la descarga de agua subterránea en el río. Estos niveles varían con la estación, imponen una restricción fundamental a las comunidades acuáticas del río porque determinan la cantidad de hábitat acuático disponible durante la mayor parte del año, lo que influye enormemente sobre la biodiversidad y el número de organismos que pueden vivir en el río.

Caudales extremadamente bajos: durante los períodos de sequía el caudal de los ríos alcanzan niveles muy bajos, lo que puede ejercer presión sobre muchos organismos, pero puede proporcionar las condiciones necesarias para otras especies. La química del agua, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno disuelto en ella pueden volverse fuentes de gran presión para muchos organismos durante los caudales extremadamente bajos, al punto en que estas condiciones pueden causar una considerable mortalidad.

Pulsos de caudal alto: cuando una tormenta produce precipitaciones abundantes o durante los períodos de deshielo, un río superará su nivel de caudal bajo. Estos pulsos incluyen cualquier incremento del agua que no sobrepase las riberas del cauce. Estos pulsos proporcionan un alivio necesario para las temperaturas altas del agua o los niveles de oxígeno pobres que caracterizan los períodos de caudal bajo, suministran un aporte nutritivo de material orgánico u otro alimento para apoyar la red alimenticia y mejor acceso a las áreas corriente arriba y abajo a los peces y otras criaturas móviles.

Pequeñas inundaciones: durante las inundaciones, los peces y otros organismos móviles pueden desplazarse corriente arriba, corriente abajo y a las planicies de inundación o a los humedales para entrar a hábitats adicionales como cauces secundarios, remansos, humedales inundados de poca profundidad.

Estas áreas generalmente inaccesibles pueden proporcionar recursos alimentarios sustanciales. Las áreas inundadas de poca profundidad son generalmente más templadas que el cauce principal y están llenas de nutrientes e insectos que estimulan un crecimiento rápido en los organismos acuáticos.

Grandes inundaciones: generalmente cambian la estructura biológica y física de un río y su planicie de inundación: Estas pueden literalmente empujar con el agua a muchos organismos y de ese modo reducir muchas poblaciones, pero en muchos casos también puede crear nuevas ventajas competitivas para algunas especies.

También pueden ser importantes para formar hábitats clave tales como meandros abandonados y humedales en planicies de inundación.

En la tabla 2.8 se presenta el resumen de los parámetros de los componentes del caudal ecológico y las influencias con el ecosistema:

TABLA 2.8
INDICADORES COMPONENTES DE CAUDAL ECOLÓGICO

| TIPO DE COMPONENTE DE CAUDAL ECOLÓGICO | PARAMETROS HIDROLOGICOS | CÁLCULO |
|--|--|--|
| Caudales bajos mensuales | Valores de la media o la mediana de los caudales bajos durante cada mes (12 parámetros) | Proporcionan el hábitat adecuado para los organismos acuáticos |
| | | Mantiene temperaturas del agua, oxígeno disuelto y químico del agua apropiados. |
| | | Mantienen el nivel freático en las planicies de inundación y la humedad de suelo para las plantas |
| | | Proporcionan agua para los animales terrestres |
| | | Mantienen los huevos de los peces y anfibios en suspensión |
| | | Permiten a los peces moverse a áreas de alimentación y desove |
| | | Apoyan organismos hiporreicos (que viven en sedimentos saturados) |
| Caudales extremadamente bajos | Frecuencia de los caudales extremadamente bajos durante cada año hidrológico o estación. Valores de la media o la mediana de los eventos de caudal extremadamente bajo: Duración (días) Pico de caudal (caudal mínimo durante el evento) Momento (fecha juliana del pico del caudal). (4 parámetros) | Permiten el reclutamiento de ciertas especies de plantas en las planicies de inundación |
| | | Eliminan especies invasoras introducidas de las comunidades acuáticas y riparias |
| | | Concentran las presas en áreas limitadas para beneficiar a los depredadores. |
| | | |
| Pulsos de caudal alto | Frecuencia de los pulsos de caudal alto durante cada año o estación. Valores de la media o mediana de eventos de pulsos de caudal alto: Duración (días) Pico de caudal (caudal mínimo durante el evento). Momento (fecha juliana del pico del caudal). Tasas de crecimiento y decrecimiento (6 parámetros) | Modelan las características físicas del cauce del río, incluidos remansos y rápidos |
| | | Determinan el tamaño de los sustratos del lecho de las corrientes (arena, guijarros, pedruscos) |
| | | Impiden la invasión de la vegetación riparia en el cauce |
| | | Restauran las condiciones de calidad normal de agua después de caudales bajos prolongados, arrastrando productos de desechos y contaminantes |
| | | Airean los huevos en gravillas de desove, impiden la sedimentación |
| | | Mantienen condiciones adecuadas de salinidad en los estuarios |
| Inundaciones pequeñas | Frecuencia de las pequeñas inundaciones durante cada año hidrológico o estación. Valores de la media o mediana de eventos de pequeñas inundaciones: Duración (días) Pico de caudal (caudal máximo durante el evento). Momento (fecha juliana del pico del caudal). Tasas de crecimiento y decrecimiento (6 parámetros) | Se aplican a pequeñas y grandes inundaciones: |
| | | Proporcionan indicios de migración y desove a los peces |
| | | Provocan una nueva fase en el ciclo biológico (por ej., insectos) |
| | | Permiten que los peces desoven en las planicies de inundación, proporcionando áreas de cría para los peces juveniles |
| | | Proporcionan nuevas oportunidades de alimentación a los peces y aves acuáticas |
| | | Recargan el nivel freático de las planicies de inundación |
| | | Mantienen la diversidad de los tipos de bosques en las planicies de inundación mediante inundaciones prolongadas (es decir diferentes especies de plantas tienen tolerancias diferentes) |
| | | Controlan la distribución y la abundancia de las plantas en las planicies de inundación |
| | | Depositán nutrientes en las planicies de inundación |
| | | |
| Inundaciones grandes | Frecuencia de las grandes inundaciones durante cada año hidrológico o estación. Valores de la media o mediana de eventos de grandes inundaciones: Duración (días) Pico de caudal (caudal máximo durante el evento) Momento (fecha juliana del pico del caudal). Tasas de crecimiento y decrecimiento (6 parámetros) | Mantiene el balance de especies en las comunidades acuáticas y riparias |
| | | Crean sitios para el reclutamiento de plantas colonizadoras |
| | | Dan forma a los hábitats físicos de las planicies de inundación |
| | | Depositán nutrientes en las planicies de inundación |
| | | Depositán grava y piedras en las áreas de desove |
| | | Empujan material orgánico (alimento) y desechos de madera (estructuras de hábitat) al cauce |
| | | Eliminan especies invasoras introducidas de las comunidades acuáticas y riparias |
| | | Esparcen semillas y frutas de plantas riparias |
| | | Impulsan movimientos laterales del cauce del río, formando nuevos hábitats (cauces secundarios, meandros abandonados) |
| | | Proporcionan a las plántulas acceso prolongado a la humedad del suelo |

FUENTE: The Nature Conservancy 2009, pp.13-14

El método se aplica en seis pasos:

Paso 1: se determina el régimen natural y sus variaciones, identificando los datos no alterados de la serie de datos disponible. Para cada uno de los 33 parámetros considerados, se determina su valor medio y sus desviaciones.

Paso 2: los caudales a aplicar deben estar comprendidos en el rango natural de caudales, comprobando cada uno de los 33 parámetros que quedan acotados entre un valor máximo y un valor mínimo (por ejemplo, los valores deben caer dentro de la Media ± 1 la SD (Desviación Estándar)) o basados en los niveles percentiles (los valores deben estar entre el 20 y 80 percentil). Estos objetivos deben estar basados en información ecológica, sin embargo, los autores recomiendan que frente a la ausencia de esta información se puede utilizar el criterio de ± 1 la Desviación Estándar (Richter, 2009, p 1052-1063).

Paso 3: en base a los parámetros determinados y sus límites admisibles, se diseña una estrategia de gestión de los caudales según los fines perseguidos.

Paso 4: determinada la estrategia de gestión, se procede a su aplicación y seguimiento, estudiando los efectos que se producen sobre el ecosistema bajo las nuevas condiciones hidráulicas.

Paso 5: al final de cada año, se caracteriza el nuevo sistema hidrológico mediante el análisis de las treinta y dos variables iniciales, comprobando que permanecen en los rangos determinados.

Paso 6: al finalizar cada año, la variación actual es caracterizada usando los mismos 33 parámetros y los valores de esos parámetros son comparados con los valores definidos como objetivos.

Paso 7: se repiten los pasos del 2 al 5 incorporando los resultados del año pasado y los datos del monitoreo y de las investigaciones ecológicas.

2.3.1.13 Método de Navarro

Este método hace una distinción en función de las poblaciones piscícolas sean de salmónidos o de ciprínidos, considerando un valor fijo para todo el año como se muestra en la tabla 2.9:

TABLA 2.9
CAUDAL MÉTODO NAVARRO

| POBLACIÓN PISCÍCOLA | CAUDAL MÍNIMO | RECOMENDACIÓN |
|----------------------|---------------|---|
| Zona de Salmónidos | Q_{330} | Sin informe favorables concesiones superiores a Q_{80} |
| Zona de Ciprinícolas | 10% Q_{an} | Si el módulo supera $50 \text{ m}^3/\text{s}$ se rebaja un 5% durante los meses de junio a octubre. |

FUENTE: Mayo 2000, p. 19

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

Q_{an} = caudal medio anual

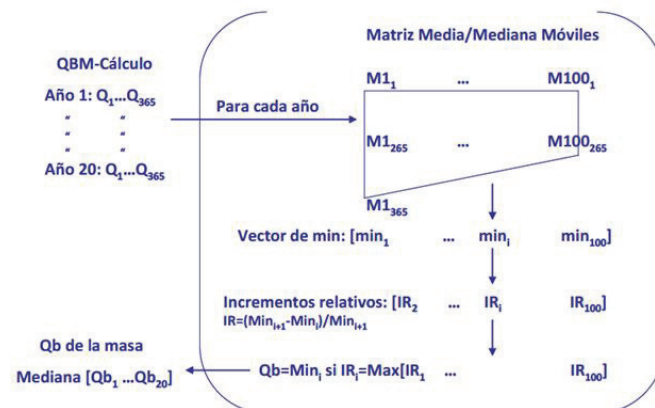
Q_{330} = caudal superado 330 días del año

2.3.1.14 Método de Caudal Base de Mantenimiento (1981)

Este método parte de que todos los componentes del hábitat fluvial: composición del sustrato, velocidad, profundidad, calidad del agua, disponibilidad de alimento, vegetación de la rívera, etc. dependen del régimen de caudales, estableciéndose así una serie de relaciones entre las variables dependientes y la variable independiente (caudal). Por lo tanto el caudal y sus variaciones determinarían los factores físicos y bióticos del hábitat fluvial. Este caudal tiene como característica principal mantener un nivel de funcionalidad biológica y garantizar la continuidad de las comunidades naturales sin la intervención del hombre (Palau, 1996, p. 23-36).

Este método se basa en el estudio de las series temporales de caudales medios diarios, mediante la utilización de medias móviles a lo largo de las series. El parámetro fundamental del método es el caudal básico, definido como el mínimo absoluto a mantener en el cauce. Este caudal básico se calcula independientemente para cada año de la serie, mediante variables de centralización móviles aplicadas a intervalos crecientes de datos consecutivos (caudales medios diarios) de orden entre 1 y 100, con los cuales se obtiene un vector de mínimos con las mismas componentes que el número de medias aplicado. Tras obtener el vector de mínimos se calculan los incrementos relativos de cada par de valores, estableciéndose el caudal básico para cada año como el caudal que determina el mayor incremento relativo como indica la figura 2.3. El caudal básico final se calcula como la media aritmética de los caudales básicos anuales obtenidos para cada año de estudio (Hernández et al., 2008).

FIGURA 2.3
ESQUEMA DE CÁLCULO CAUDAL BASE



FUENTE: Hernández et al 2008, p. 51

2.3.1.15 Método de Caudal Base o de Nueva Inglaterra (1981)

Fue desarrollado por el Servicio de Pesca y Fauna de Estados Unidos en 1981. Se recomienda un caudal mínimo cuyo cálculo se basa en registros históricos de caudal, a partir de la mediana calculada en el mes de agosto, que corresponde al registro más bajo (el cual constituye el caudal mínimo o básico por mantener a través de todo el año), con la excepción de los períodos de reproducción e incubación de especies piscícolas. En este período la mediana mensual o más baja para el caudal mínimo, corresponderá a la del caudal durante ese período, si es superior al caudal básico. Sin embargo el cálculo de la mediana sólo es válido para cursos de aguas naturales en donde exista un registro de caudales mayores a veinticinco años (Aqualimpia y Castro, 2006, p. 6).

En otras situaciones, en cursos de aguas naturales en los que se verifican derivaciones importantes en el tamaño de registros de caudales inferiores a veinticinco años, un caudal mínimo es un porcentaje de caudal definido en función del área de la cuenca hidrográfica (ver tabla 2.10). Cuando un caudal de agua es menor a lo definido en este criterio, corresponderá al instantáneo para ese mismo período. Las variables utilizadas en este método son los períodos estacionales del año, el caudal mínimo anual y el rendimiento de la cuenca.

TABLA 2.10
CAUDAL MÉTODO CAUDAL BASE

| ESTACIÓN DEL AÑO | PERIODOS DE REGISTROS HISTÓRICOS | |
|--|---|-----------------------------|
| | Inferiores a 25 años (m ³ s-1/Km ²) | Superiores a 25 años (a) |
| Abril a primera quincena de junio (b) | 0.29 | 100% mediana de agosto (c) |
| Segunda quincena de junio a septiembre | 0.04 | 100% mediana de agosto (c) |
| Octubre a marzo (b) | 0.07 | 100% mediana de agosto (c) |

FUENTE: Loar y Sale 1981, p. 6
ELABORACIÓN: Verónica Yépez

- (a) Río natural, cuenca hidrográfica superior a 130 km², precisión superior o igual al 10 %.
- (b) Periodo de postura o incubación. Si el caudal de agua es inferior al mes de agosto, entonces el caudal se debe verificar localmente con los cursos de agua.
- (c) Si el caudal de agua es inferior al mes de agosto, entonces el caudal se debe verificar localmente con los cursos de agua.

2.3.1.16 Método del Caudal Medio Base (1980)

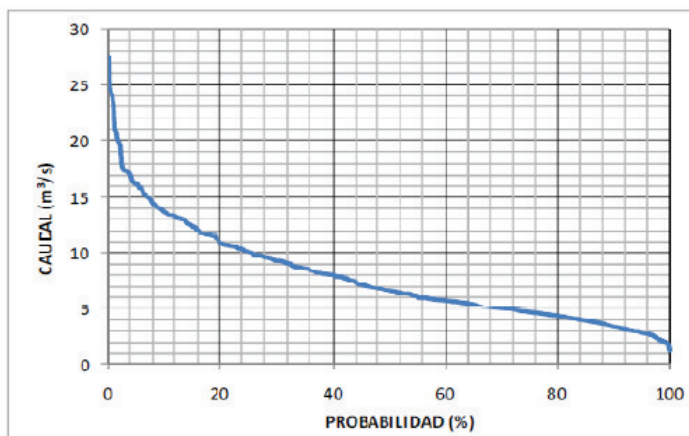
Este método fue desarrollado en Nueva Inglaterra por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos en 1980. Es uno de los métodos más usados en los proyectos hidroeléctricos de Estados Unidos. Propone el caudal mínimo de verano -media de los caudales medios multianuales de agosto- como el caudal ambiental, ya que representa la condición natural más severa que la comunidad de especies del cauce podría experimentar.

Para corrientes sin registros, el caudal medio para verano se estima en 0,5 pie³/s milla² de área drenante; mientras que cuando son necesarios caudales altos en otras épocas del año para satisfacer las necesidades biológicas - desove, migración, entre otras, se recomienda 1,0 pie³/s milla² para invierno y 4,0 pie³/s milla² para primavera. (Castro, et al, 2006; Hutchins, 2005; Pyrcce, 2004).

2.3.1.17 Método de la Curva de Permanencia o Curva de Duración de Caudales (1999).

Consiste en la construcción de una curva a partir de datos de caudales diarios, mensuales o anuales donde se presenta la relación entre ciertos rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido. El caudal ecológico es expresado como un valor fijo que corresponde a un rango de caudal que se mantiene igualado o excedido un cierto porcentaje de tiempo (Silveira y Silveira, 2003). En países como Brasil, se estiman caudales mínimos ecológicos de esta manera. En el Estado Pernambuco se calculó indirectamente un caudal ecológico como el 5% de Q_{90} . Es decir, un porcentaje de 5% del caudal que es excedido o igualado en 90% del tiempo de observación (Benetti, Lanna, y Cobalchini, 2003, p. 149-160). En la figura se presenta un ejemplo de la curva de permanencia.

FIGURA 2.4
CURVA DE PERMANENCIA O DURACIÓN DE CAUDALES



FUENTE: Almeida 2010, p. 201

En la tabla 2.11 se muestran los diferentes usos que se han dado a los índices determinados a partir de las Curvas de Duración de Caudales (CDC).

TABLA 2.11
INDICES CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

| INDICE DE FLUJO | USO |
|-------------------------|---|
| Q ₉₅ | Usado como mínimo de caudal o indicador de condiciones mínimas extrema |
| | Condición mínima mensual en los puntos de descarga |
| | Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual |
| | Usado para mantener la variación estacional mensual |
| Q ₉₀ | Usado como índice de caudal base |
| | Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable |
| | Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático |
| | Caudal crítico considerado como el caudal mínimo limitante |
| | Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un conservativo de caudal base |
| Q ₅₀ Mensual | Caudal base para el manejo y planeación del recurso |
| | Usado para proteger la biota acuática |
| | Mínimo caudal recomendado en un río con represa |

FUENTE: Claudio y Martínez 2013, p. 5

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

2.3.1.18 Método de caudal mínimo de 7 días con un tiempo de ocurrencia de 10 años 7Q₁₀ (1976).

Este método entrega el valor de un caudal mínimo estadístico 7Q₁₀ que corresponde al valor que en promedio, cada diez años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivos. Para calcular el valor del 7Q₁₀ es necesario primero definir los valores medios móviles con ventana de 7 días, que representan los caudales promedios semanales, y posteriormente definir el valor mínimo de cada año. El método

supone que a valores menores que éste puede generarse un stress ecológico ya que la falta de agua produce una sobrecarga de tensión que se ve reflejada en el ecosistema, por la aparición de anomalías que impiden el normal desarrollo y funcionamiento de las comunidades biológicas que ahí viven (Benetti, et al 2003). También existen otras aproximaciones similares utilizando la estadística hidrológica que describe las condiciones de sequía como el “7Q2” y el “10Q5” (Jamett y Rodrigues, 2005, p. 83-96)

2.3.1.19 Método Northern Great Plains Resource Program (NGPRP - 1974)

Método desarrollado en Estados Unidos de América, donde el caudal ecológico es determinado a partir de la Curva de Duración de Caudales (CDC) medios diarios para el mes analizado de acuerdo con las siguientes consideraciones:

TABLA 2.12
CAUDALES MÉTODO NGPRP

| ESTACIÓN | CAUDAL MÍNIMO |
|---------------|-----------------|
| Meses secos | Q ₉₀ |
| Meses húmedos | Q ₅₀ |

FUENTE: Consuegra2013, p.34

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

El establecimiento de los meses húmedos o secos se realiza según el procedimiento señalado en el método de Tennat (1976). Los caudales medios diarios con longitud mayor a 20 año de registro.

2.3.2 METODOLOGÍA HIDRÁULICA

En estas se considera la relación entre el caudal, las características físicas del cauce y las interacciones entre el medio biótico y abiótico que configuran los ecosistemas. Se estudian las características físicas del cauce entre las cuales están el perímetro mojado (P), la velocidad (V) y la profundidad de la lámina de agua o calado (Y), el sustrato, la cobertura vegetal. Se basa en el estudio de una o más secciones transversales del cauce (Gippet, 2001, p. 285; Tharme, 2003, pp. 201, 405-115).

2.3.2.1 Método del Perímetro Mojado (1984)

Es un método que busca establecer un índice de disponibilidad de alimento para los peces, asumiendo que al maximizar el perímetro mojado habrá más alimento y hábitat aprovechable para la comunidad acuática. La masa de agua, que circula por el cauce está limitada por el fondo o lecho, por los dos bancos laterales y por la superficie libre en contacto con la atmósfera. El perímetro mojado es la suma de la anchura del lecho y la longitud transversal de los bancos laterales. Para determinar el caudal se hace uso de la relación directamente proporcional entre el perímetro mojado y el caudal: a medida que aumenta este último se incrementa el otro desde un nivel base de caudal, hasta alcanzar un punto de inflexión, después del cual, el incremento del perímetro mojado crece muy lentamente hasta llegar a una sección llena acuática (Castro *et al.*, 2006, pp. 13-15; Jamett y Rodrigues, 2005, pp. 11-12; Vilchez, 2010, pp. 4-5).

La forma de aplicación de este método consiste en ubicar un sector o tramo del río, que se considere el más crítico, es decir el más sensible a variaciones del caudal para luego realizar una curva que relaciona el caudal con el perímetro mojado como se muestra en la figura 2.5.

A un determinado caudal corresponderá una velocidad media de la sección que puede ser despejada de la fórmula:

$$Q = V * A \quad (2.15)$$

Donde

Q = caudal (m^3/s)

V = velocidad (m/s)

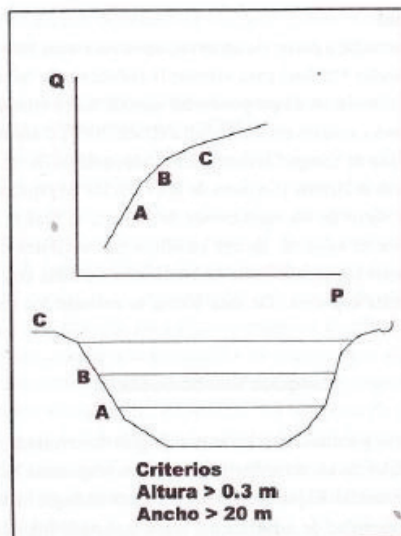
A = área (m^2)

Utilizando la fórmula de Manning (1889), que obtiene la velocidad (V) en función del coeficiente de rugosidad (η), de la pendiente longitudinal (I), del área de la sección (A) y del perímetro mojado (P) según la expresión:

$$V = \frac{\left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}}}{\eta} \quad (2.16)$$

Se puede determinar el perímetro mojado para distintos caudales a los que corresponderá una determinada velocidad media de la sección como se muestra en la figura 2.6.

FIGURA 2.5
MÉTODO DEL PERÍMETRO MOJADO



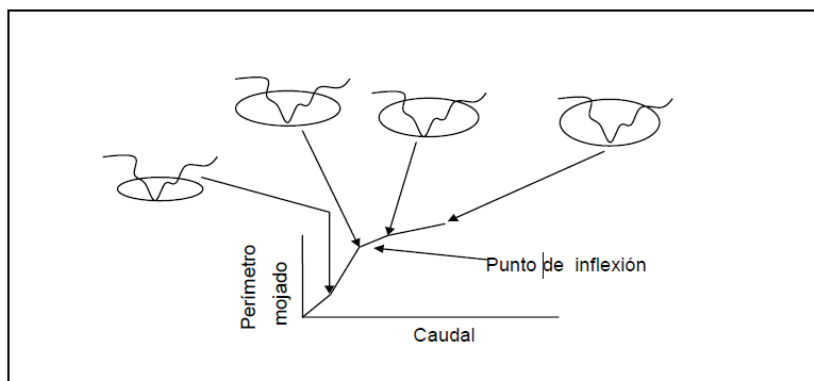
FUENTE: Guevara y Rodriguez, 2013, p. 81

- Un primer punto que relaciona la variación del perímetro mojado con el caudal, definiendo de esta manera el caudal óptimo.
- A partir de este primer punto se extrae un segundo punto de inflexión, va revelar un caudal generador

Para el estudio se recomienda al menos 3 a 10 secciones transversales críticas hay algunos casos de 20 secciones (Bietz, Martin, y Englert, 1985; Alcázar, 2007, p. 5).

De acuerdo con Díez Hernández el método se aplica a ríos que tengan como características corrientes anchas, poco profundas y casi rectangulares, fue creado enfocándose principalmente en especies de salmones. Generalmente el flujo recomendado es aquel cerca de este punto de inflexión pues se presume es el punto óptimo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos.

FIGURA 2.6
CURVA CAUDAL – PERÍMETRO MOJADO



FUENTE: Stalnaker, Lamb, Henriksen, Bovee, y Bartholow, 1995, p. 99

2.3.2.2 Método de Múltiples Transectos (Multiple Transect Methods 1978)

Se considera un método conservativo que estima caudales altos (Richardson, 1986), este método evalúa varias secciones transversales de una corriente, en las cuales se miden, bajo diferentes caudales (Q) la velocidad (V), el calado (Y), el sustrato y la cobertura vegetal, con el objetivo de someter a estas variables a una modelación hidráulica para determinar los cambios en las mismas, con lo cual se establece una idea de la respuesta del río a las variaciones del caudal (Q) para posteriormente determinar las condiciones de habitabilidad con lo cual se establece el caudal ecológico. Las condiciones de habitabilidad pueden responder a un caudal que minimice los cambios fisicoquímicos en la corriente por efectos de vertidos, un caudal que garantice el transporte de sólidos, un caudal que asegure la posibilidad de la recreación pasiva, o aquel caudal que de acuerdo con las características del transecto sea de mayor importancia.

En el caso de los múltiples transectos, se requiere la medición directa de caudales (aforos líquidos y batimetrías) así como determinar en forma simultánea el tipo de sustrato y cobertura vegetal asociada. Del análisis de la información recopilada se determinará el caudal ecológico favorable para la corriente y se establece como criterio un caudal que ocupe el 10% del cauce, un caudal que evite estancamientos del agua, un caudal que asegure la irrigación de la vegetación ribereña o aquel criterio que sea de mayor importancia para de acuerdo con las características del transecto (Richardson, 1986, p, 143-167; Arthington y Zalucki, 1998, p. 141).

2.3.2.3 Método de Idaho (1975)

Este método fue desarrollado a partir de observaciones en “varios ríos no vadeables” en Idaho (Estados Unidos) para estimar la reducción del hábitat debido a la reducción del caudal circulante. El método recomienda caudales en función del objetivo que se busca y de la especie estudiada.

La información requerida para determinar los caudales es:

- Levantamientos topográficos de la zona de estudio.
- Secciones transversales: profundidad o calado, velocidad y tipo de sustrato.

Con la información de campo conocida así como el objetivo es decir la especie de interés se comparan los escenarios de simulación con las necesidades de hábitat para las distintas especies animales, florales o especies de interés y así recomendar el caudal (Claudio y Martínez, 2013, p. 44).

2.3.2.4 Método de Simulación Hidráulica de White (1976)

En distintas secciones de un tramo se establece la relación algebraica existente entre el perímetro mojado y el caudal circulante. A partir de esta relación, los caudales se determinan teniendo en cuenta las condiciones de freza, cría y migración de ciertas especies de peces.

Este proceso requiere realizar el procedimiento del método del perímetro mojado, con la variación que existen especies faunísticas de peces que deben ser escogidas como objetivo (Castro, Carvajal, y Monsalve, 2006, p- 111-133).

2.3.2.5 Método R2Cross

Este método fue utilizado en el Río Colorado en Estados Unidos en secciones determinadas. Este método tiene como particularidad que solamente busca mantener el “estado ecológico de un tramo” del cuerpo acuático, mediante éste se hace uso de los factores de profundidad, velocidad y perímetro mojado (Díez-Hernández, 2005, pp. 11).

2.3.3 METODOLOGÍA HIDROBIOLOGICA O SIMULACIÓN DE HABITATS

Establecen una correspondencia entre el hábitat de las especies fluviales y las características hidráulicas que varían en función de los caudales circulantes. Utilizan como base la respuesta de una especie, normalmente piscícola, a aumentos discretos de caudal. La respuesta se mide como el aumento del hábitat físico en función del cambio en determinantes variables hidráulicas.

2.3.3.1 Método de la Conservación de los hábitats de Nehring (1979)

Propone el mantenimiento de determinadas características del hábitat fluvial, de acuerdo con el autor, son condiciones mínimas para la no desnaturalización del ecosistema fluvial. El caudal será aquel que cumpla como mínimo con dos condiciones sean estas: profundidad, velocidad de agua o perímetro. Se determinará el caudal en función de una combinación de los tres parámetros citados. Por ejemplo el caudal que mantenga una profundidad y una velocidad en concreto, o que nos proporcione cierta cantidad de perímetro mojado en la sección con una velocidad media preestablecida. En este método se pueden aplicar fórmulas como la de Manning (1889) manteniendo constante el perímetro mojado y la velocidad, la fórmula del caudal fijando la velocidad y la profundidad media o combinación de las dos fórmulas. El caudal mínimo será aquel que proporcione una profundidad media entre 12 cm y un cincuentavo de la anchura del cauce ($b/50$ cm) (Mayo, 2000, p.25).

2.3.3.2 Método de Vasco (1995)

Este método se basa en el mantenimiento de la diversidad ecológica, mide la diversidad por el número de taxones de la comunidad de macro invertebrados bentónicos (Docampo y García de Bikuña, 1995, p. 292-311). Se analiza una serie de datos foronómicos, pluviométricos y de calidad de las aguas, se considera la contaminación química y posibles agresiones al medio fluvial.

El caudal determinado a través de este método es un caudal base que debe mantenerse todo el año y que no debe disminuir salvo casos excepcionales (ejemplo sequía prolongada).

Se establecen los siguientes criterios para la determinación del caudal ecológico:

- 1) Debe generar un perímetro mojado, capaz de permitir la habitabilidad de 23 taxones de invertebrados.
- 2) En todas las estaciones generará un calado mínimo fijado según las condiciones particulares de cada estación.
- 3) La velocidad de la corriente será inferior en todas las estaciones a 60 cm/s, ya que, a partir de este valor, se produce el arrastre de un gran número de especies biológicas y se inhibe el desarrollo somático de las que resisten el arrastre.
- 4) El caudal aconsejable generará un valor del índice de calidad del hábitat (ICH) respecto a la profundidad y velocidad adecuado, tanto para los peces como para los invertebrados. Este índice de calidad de hábitat no es más que una función de preferencia de la especie con respecto a los parámetros hidráulicos considerados, evaluado como una frecuencia de ocurrencia entre 0 y 100%

Los caudales se calculan en función del orden fluvial del cauce (basado en la jerarquía de los afluentes Strahler y Strahler, 1997), y de la media geométrica de los caudales registrados en las distintas estaciones de aforos durante un periodo mínimo de tres años hidrológicos. Los caudales se calculan para cada mes (Mayo, 2000, p. 21).

2.3.3.3 Método de Fleckinger (1980)

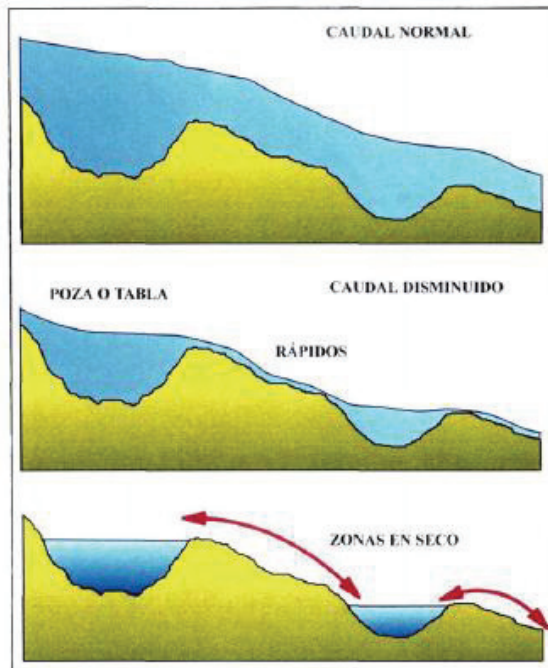
Es un método empírico, considera varios parámetros morfológicos y la biota del río (Fleckinger, 1980). Consiste en analizar una serie de secciones o transectos con distintas anchuras y regímenes de corriente (distintas velocidades). Se establecen distintas hipótesis de reducción del caudal y utilizando unas tablas empíricas se obtienen las nuevas condiciones de velocidad, profundidad, anchura, etc. Como caudal mínimo se toma aquel que permite un reparto adecuado entre las distintas zonas de remansos y de rápidos.

El análisis según Fleckinger está íntimamente correlacionado con la especie piscícola en cuestión. Según el autor, el caudal mínimo suele ser un 30% del caudal de estiaje y del 7% al 9% del caudal medio anual, según se trate de un periodo normal o deficitario respectivamente (Mayo, 2000, p. 25).

2.3.3.4 Método de García Dávila (1991)

Este se basa en el comportamiento hidráulico de diferentes pozas o remansos del río en cuestión, estudiando las condiciones de la salida del agua de la poza, de forma, que no queden zonas del río en seco, y que se permita la libre circulación de los peces. Se determina el caudal mínimo en base a la existencia de poblaciones de salmónidos. Las zonas susceptibles a quedar secas, serían las de aguas rápidas de los tramos de menor profundidad media, en la figura 2.7 se muestran las zonas de mayor sensibilidad ante la disminución de caudal.

FIGURA 2.7
ZONAS CRÍTICAS



FUENTE: Mayo, 2000 p. 27

Los parámetros hidrológicos que se evalúan son:

- Caudal medio anual, mensula y diario
- Caudal de avenida
- Caudal generador del lecho
- Caudal superado 347 días de año (Q_{347})
- Caudal de infiltración en función de la granulometría del sustrato.

El cálculo de este caudal resulta bastante complicado, aplicándose para ello la fórmula de Darcy (1883) modificada. Se determina, posteriormente, el caudal que rebosa de las pozas, por aplicación de las fórmulas de vertederos de pared gruesa. El caudal mínimo se halla en función de este caudal, descontando el de infiltración de forma que se satisfagan las condiciones de profundidad media recomendada por Nehring (Mayo, 2000, p. 26).

2.3.3.5 Método del análisis incremental (1976)

Las necesidades de los peces están íntimamente relacionadas con variables físicas como la velocidad, profundidad, cobertura y las variables químicas como temperatura, pH, nivel de oxígeno disuelto. El análisis incremental plantea un estudio del hábitat, mediante la evaluación de secciones transversales del río. En cada una de estas secciones se determina un número de celdas individuales, en las que se observa como varían los distintos parámetros físicos, químicos y del hábitat, en función de la cantidad de agua que las atraviesa; es decir, en relación con los distintos caudales circulantes. Se obtienen así unas curvas de evolución del hábitat en función del caudal. De este análisis se han ido obteniendo las llamadas funciones de preferencia, curvas de preferencia o de probabilidad de uso de las especies piscícolas con respecto a los parámetros físicos, químicos y de cobertura del hábitat fluvial (Stalnaker y Arnette, 1976; Mayo, 2000, p. 28).

2.3.3.6 Método del Micro Hábitats (1978)

Una vez evaluado el hábitat fluvial y obtenidas las relaciones con el caudal circulante, se efectúa el análisis de las especies respecto al hábitat (Bovee y Milhous, 1978, p. 242; Stalnaker, 1980; Mayo, 2000, p. 29). Para el estudio se utilizan las curvas de preferencia, que incluso consideran diferentes estadios vitales (desove, alevines, juveniles, adultos) de la especie estudiada. Existen curvas de preferencia para distintos parámetros, siendo las más utilizadas las que expresan las preferencias de profundidad, velocidad del agua, sustrato y cobertura. Para cada caudal circulante, y por aplicación de estas curvas, podremos conocer la mayor o menor disponibilidad de hábitat que se traduce en una superficie útil a disposición de los peces.

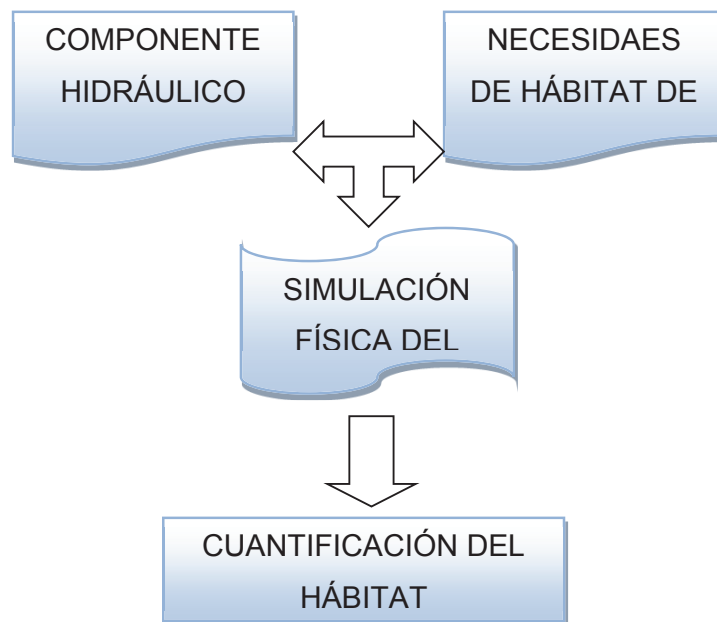
Este análisis permite tomar decisiones a la hora de fijar un caudal mínimo, de forma que esa superficie sirva para el desarrollo y permanencia de las poblaciones, o bien, para conseguir un determinado efecto o favorecer aquel estadio que más nos pueda interesar.

2.3.3.7 Modelo de simulación del hábitat físico (PHABSIM 1981)

Physical Habitat Simulation Model (PHABSIM), simula las condiciones hidráulicas del micro hábitat, calcula la profundidad del agua, velocidad y demás características del cauce que podrían verse afectadas. Este modelo fue diseñado para ser aplicado en el hábitat de los peces, por lo que requiere de mucha información para poder ser aplicado (Tharme, 1996). Al aplicar esta metodología también se toma en cuenta la afectación que puede haber sobre el macrohábitat estudiando la calidad del agua y controlando el aumento o disminución de la temperatura.

Este modelo tiene dos componentes principales, el primero es el relativo al comportamiento hidráulico del cauce y el segundo el relativo a las necesidades de hábitat de la especie considerada. Las bases de este modelo consisten en realizar una simulación física del hábitat, y correlacionarla con los efectos inducidos sobre las poblaciones acuáticas, especialmente piscícolas.

FIGURA 2.8
COMPONENTES PHABSIM



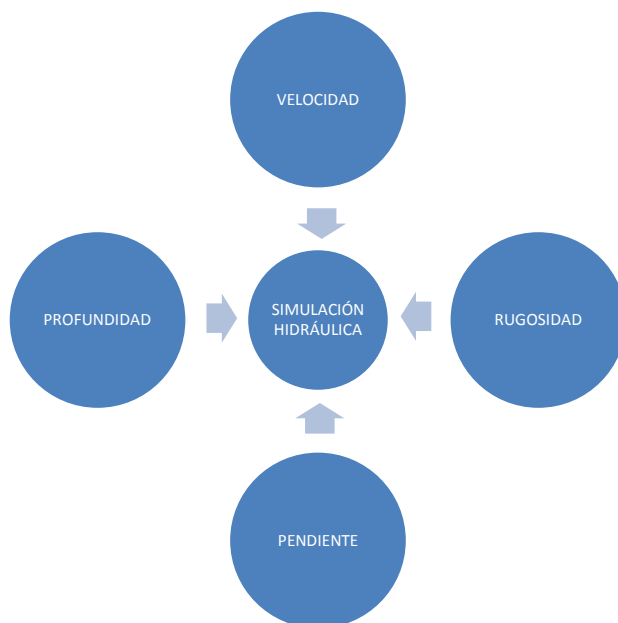
ELABORACIÓN: Verónica Yépez

El método PHABSIM se basa en la determinación de las secciones del tramo representativo en estudio y en ellas un mosaico de celdas transversales cuya longitud y anchura se determinará in situ. Cada celda identificada en el tramo tendrá una profundidad, velocidad, substrato, refugio y dimensiones determinadas y distintas de las demás, y al simular otros caudales circulantes por el tramo los valores de dichos parámetros variarán.

El estudio se realiza como una estructura independiente del régimen de caudales, es decir que la hipótesis de partida no se ajusta a la realidad, pues las dimensiones del cauce se reajustan con el cambio de caudal (depósito de sedimentos o erosión según la capacidad de transporte), simplificación que permite abordar el problema, caso contrario se tendría más incognitas y menos ecuaciones para su resolución.

Cuando se conoce la estructura del cauce se realiza el estudio de evaluación de las variables que intervienen en el escurrimiento:

FIGURA 2.9
PROCESO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

La simulación hidráulica se realiza bajo la hipótesis de que no existe variación de la carga sólida, es decir se supone que permanece constante en el rango de caudales a manejar.

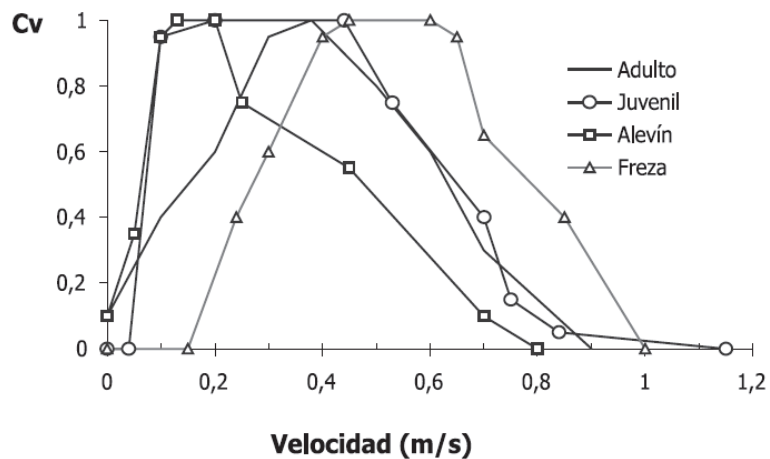
Las actividades previas que permiten modelar el efecto de los cambios caudal de la corriente en estudio son:

- Inventario de hábitats eco-hidráulicos existentes en un tramo en concreto.
- Levantamientos topográficos en los tramos de estudio.
- Reconocimiento de sustrato y medición de velocidades medias (V) de la corriente así como de las profundidades de lámina de agua (Y).
- Reconocimiento de las características físico-químicas del agua (temperatura, pH y oxígeno disuelto)
- Curvas de preferencia asociadas a una variable de estudio (V y/o Y , por ejemplo) y una(s) especie(s) específica(s).

Para el análisis se utiliza un paquete de programas informáticos, que permiten estudiar el comportamiento de una sección del tramo en estudio con distintos caudales, bajo un análisis hidráulico/hidrológico y biótico, con la integración de estos aspectos se obtiene mediante gráficos las curvas de variación de la superficie ponderada útil con el caudal circulante.

Las características óptimas, se manejan mediante curvas de preferencia, que reproducen el grado de adecuación de un organismo y estadio vital (adulto, juvenil, alevín, freza, etc.) respecto a las variables que determinan su hábitat, evaluado mediante un coeficiente que varía de cero a uno (C_v – el subíndice v responde a las abscisas donde se gráfica la velocidad), donde 1 define el estado máximo de adecuación y 0 un estado podre o nulo de adecuación. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo es la curva de preferencia.

FIGURA 2.10
CURVA DE PREFERENCIA REFERENCIAL TUCHA ARCO IRIS

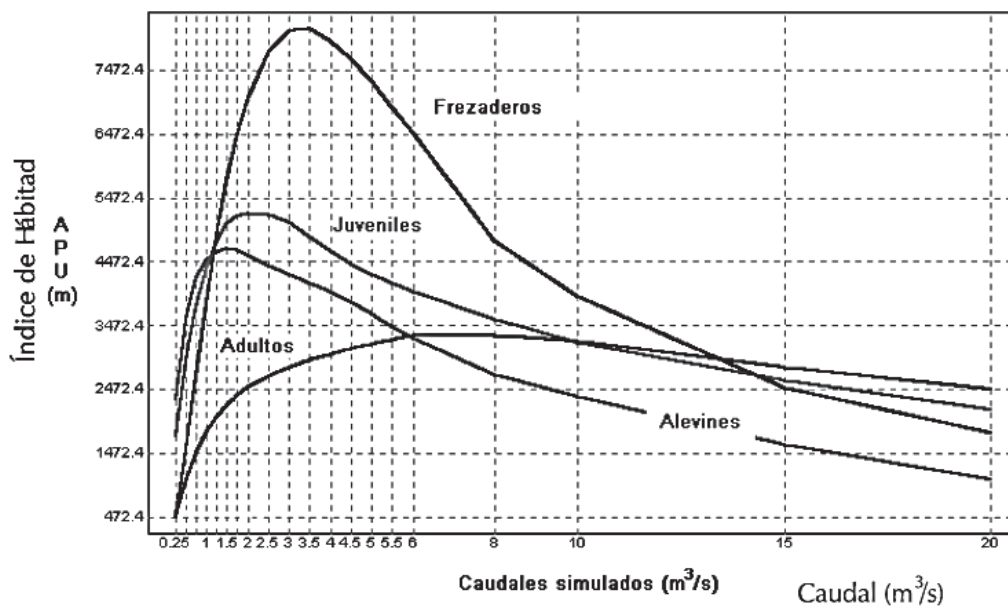


FUENTE: Claudio y Martínez, 2013, p. 47

La modelación posterior se realiza combinando los campos simulados de profundidades y velocidades con las curvas de preferencia de la(s) especie(s) objetivo, para obtener las relaciones entre el caudal Q y un “índice de hábitat (IH)” a partir de las cuales se determinan los caudales ecológicos convenientes para cada organismo y estadio vital estudiado.

Finalmente de acuerdo con las curvas IH vs Q que se construyen como se muestra en la figura 2.11, se identifican los puntos de inflexión donde el cambio de pendiente es más notorio y que representan los caudales mínimos permisibles para la corriente y especie(s) de interés.

FIGURA 2.11
RELACIÓN Q –IH PARA LOS CUATRO ESTADIOS DE LA TUCHA



FUENTE: Claudio y Martínez, 2013, p. 48

La validez de este método se puede resumir en lo siguiente:

- El modelo puede predecir el impacto de los cambios de caudal sobre los peces, invertebrados y macrofitas.
- El principal impacto de las variaciones de flujo se traduce en los cambios de profundidad y velocidad. Estos dos parámetros son variables básicas en el modelo IFIM, prediciendo el modelo su variación en función del caudal.
- IFIM predice los cambios físicos del hábitat y cuantifica la pérdida o ganancia de su valor ecológico. Valores relativos del hábitat físico son más importantes que los valores absolutos.
- IFIM, al relacionar el hábitat con el caudal, proporciona una variable cuantificable, que permite negociar los caudales ecológicos en términos equivalentes a los de otras demandas sobre el recurso.

En esta filosofía se parte siempre de la hipótesis de que las aguas en cuestión tienen suficiente calidad para la especie o especies piscícolas que se consideren.

2.3.3.8 Método basado en la geomorfología (Thoms y Sheldon, 2002)

El método plantea los siguientes pasos para la determinación del caudal ecológico en donde es necesario el análisis de la información hidrológica, hidráulica y geomorfológica de los microhábitats que formen parte del estudio:

- Determinación de la naturaleza física (hábitat) del sistema: a partir de imágenes de sensores remotos, fotografías aéreas, datos históricos y estudios de campo se describe el sistema en múltiples escalas enfatizando e interpretando ecológica y funcionalmente los hábitats físicos dominantes y su conexión.
- Determinación de los caudales asociados con los principales hábitats físicos y las funciones ecológicas. Estos análisis se hacen en secciones transversales representativas, en las cuales se establece la relación caudal-hábitat.
- Identificación de conductores hidrológicos claves del sistema ribereño y determinación de las implicaciones del uso de los recursos hídricos. Para esto, se define la “firma hidrográfica” del río, la cual depende de la geomorfología, la conectividad longitudinal, los intercambios verticales, la conectividad lateral, los caudales de mantenimiento de los canales, los caudales mínimos y los caudales estacionales. Mediante modelación se analizan los impactos de la utilización de los recursos hídricos sobre la firma hidrográfica y se establece el comportamiento hidrológico a varias escalas temporales (régimen de caudales a más de 100 años, historia de los caudales entre 1 y 100 años y pulsos de inundación de menos de un año).

Establecimiento de opciones de manejo del caudal teniendo en cuenta las características hidrográficas del río para determinar sus opciones de extracción. Aquí es necesario pronosticar si los pulsos de inundación afectarán los niveles de prioridad para la conservación del funcionamiento ecológico y en qué zonas del río ocurrirán. Los pulsos que superen el nivel de prioridad corresponden al caudal que puede ser utilizado en consumo.

2.3.3.9 Régimen Estacional de Caudales Ecológicos (RECE 1997)

Este método requiere la siguiente información:

- Registro de caudales (diaria, mensual o anual).
- Información batimétrica de la corriente hídrica de interés en donde se debe identificar las cotas de inundación.
- Estudio de la cobertura vegetal ribereña
- Estudio de las especies faunísticas (bentos, peces, etc.) o vegetal que resulte de interés.

El procedimiento para el cálculo del caudal ecológico se describe a continuación:

1.- Determinación del periodo mínimo para el cual deben estimarse los caudales ecológicos (cada mes, época del año, etc.) y ajuste de la función de distribución estadística de la serie de caudales aforados o simulados del periodo considerado.

2.- Cálculo del caudal de cambio mediante el primer punto de inflexión no nulo de la curva que ajusta la función de distribución de caudales. Este caudal de cambio está destinado a ser el caudal ecológico de cada periodo, si cumple una serie de criterios biológicos y fisicoquímicos (ver acápite 4).

3.- Modelización hidráulica que permite establecer la relación entre la hidrología (caudal de cambio) y las características fisicoquímicas y biológicas del ecosistema fluvial.

4.- Comprobación del cumplimiento de criterios abióticos y biológicos, entre los que destacan:

- Vulnerabilidad hidráulica de los cauces a la continuidad del flujo, derivada de la detración de aguas.
- Irrigación de la vegetación de riberas (conservación del bosque de galería).
- Conservación de la biodiversidad fluvial, estimada como riqueza de especies de invertebrados de bentos, peces y batracios.
- Índice de Calidad del Hábitat (ICH) de especies biológicas catalogadas o emblemáticas, si las hubiese. El ICH es la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de una especie (o conjunto de especies) frente a un valor de una variable fisicoquímica, y es equivalente a las curvas de preferencia del hábitat del modelo IFIM, de las cuales difiere en dos aspectos fundamentales:
 - El ICH se establece no solamente para las variables físicas del cauce (temperatura, calado, velocidad, coberturas, etc.) como lo hace el modelo IFIM, sino también para parámetros químicos (O_2 , Ca^{2+} , NO_2^- , NH_3 , etc.).
 - Las curvas de ICH no se obtienen mediante regresión polinómica como en el modelo IFIM, si no aplicando el método estadístico de la máxima verosimilitud a la familia de transformaciones de Box – Cox (1962), que normaliza la función de distribución de frecuencias acumuladas, y se toma como ecuación universal de la integral de la curva de Gauss la publicada en la revista del Ingeniería Civil número 103 (Docampo, 1996).

2.3.3.10 Método del Índice de Calidad de Hábitat (1979)

Este método fue desarrollado por Binns y Eiserman (1979) para predecir la biomasa de trucha en ríos de Wyoming (Estados Unidos) se basa en la hipótesis de que el mejor hábitat para la trucha está asociado con una producción de biomasa alta. Es un método empírico basado en el análisis estadístico de datos procedentes de ríos para obtener un conocimiento sobre los factores que rigen la calidad de hábitat para la trucha. Se recogieron datos de 44 punto de muestreo de los ríos estudiados para cubrir un rango amplio de tipos de hábitats.

Características de los tramos muestreados:

- Elevación varia de 1146 – 3042 m
- Anchura del río al final del verano variaba de 1,4 a 44m
- Oscilación del caudal diario entre 0,6 y 14,6 m³/s
- Pendientes 0,1 y 10%

Se realizaron análisis de regresión múltiple sobre 22 parámetros diferentes que representaban las características físicas, químicas y biológicas de los ríos.

- Atributos físicos: caudal de final de verano, variación del caudal anual, temperatura máxima del agua en verano, velocidad del agua, turbidez, refugio, anchura de la lámina de agua, profundidad, morfología del cauce, erosionabilidad de las orillas, condición del substrato, tipo de material del lecho y sedimentación de limos
- Atributos químicos: contenido en nitratos, alcalinidad total, fósforo total, sólidos disueltos totales e iones nitrogenados.
- Atributos biológicos: vegetación de ribera y abundancia, diversidad y tipo de alimento para peces.

Consideraciones previas para la determinación de los atributos:

- El caudal de final de verano fue calculado comparando el caudal medio diario de agosto y primera mitad de septiembre con el caudal medio diario de todo el año.
- La velocidad del agua se calculó como la que se obtenía de la longitud del tramo estudiado dividido por el tiempo que un marcador fluorescente tardó en recorrer dicha distancia.
- Refugio fue identificado como cualquier aspecto o cosa que permitió a las truchas eludir el impacto de enemigos o elementos del medio (Binns y Eiserman, 1979, pp. 215-218) tales como profundidad de agua, turbulencia superficial, substrato suelto, grandes rocas y otros elementos sumergidos, cuevas en orillas, vegetación acuática y terrestre en galería, ramas muertas y otros restos de plantas en el cauce (una definición muy amplia y subjetiva).
- El porcentaje de orilla erosionada se estimó dividiendo la suma de longitud de tramos en los que se observó erosión en la ribera por la longitud total de la ribera del tramo estudiado.
- La condición del substrato se obtuvo basándose en la disponibilidad de vegetación acuática sumergida (incluyendo algas y líquenes sobre rocas).

2.3.4 METODOLOGÍA HOLÍSTICA

Las metodologías holísticas han sido desarrolladas y muy utilizadas en países como Sudáfrica y Australia fundamentalmente porque en estos países existe una alta variabilidad en el régimen de caudales y se han construido grandes represas que han transformado las características hidrológicas de las cuencas. Es un procedimiento o protocolo con el que el caudal ecológico se deduce buscando una solución consensuada a partir de un análisis independiente de la magnitud y distribución del caudal que necesitan los componentes del ecosistema fluvial objetivo, sean aspectos abióticos (geomorfología, calidad del agua, etc.), ecológicos (comunidades naturales), paisaje, socio-económicos o todos en conjunto. Requiere de información

extensa y de muy alta calidad (Bragg et al., 2005, pp. 217-518; Vilchez, 2010, pp. 6-8; Tharme, 2003, pp. 410-415).

Este enfoque parte de los siguientes supuestos:

- El agua pertenece al ambiente y otros usuarios del agua pueden satisfacerse de la cantidad de agua que el río no requiere.
- Los ríos poseen más agua de la que es estrictamente necesaria para el mantenimiento del ecosistema.
- Si las características esenciales del régimen de caudal natural se identifican e incorporan adecuadamente en el régimen de caudal modificado, entonces la biota existente y la integridad funcional del ecosistema se mantendrán.

Existen métodos “bottom-up”, donde el régimen de caudales se construye por sumatorio de requisitos de caudales para los distintos objetivos, a partir de un nivel de caudal nulo. También existen métodos top-down se establecen los caudales determinando la detracción de caudales máxima que se puede conseguir respecto al régimen natural.

2.3.4.1 Evaluación por grupo de expertos (1995)

Es un método tipo “bottom-up” propuesto en Australia por Swales y Harris (1995) y plantea que un grupo de expertos en varios temas (ecología de peces, macro invertebrados y geomorfología) deben llegar a un consenso sobre los efectos de los cambios en el caudal sobre el sistema. Este método está enfocado hacia la conservación de peces y requiere pocos datos de campo, se confía en el juicio de profesionales. Es un método subjetivo y simplista en términos ecológicos, al cual no puede realizársele una validación posterior.

2.3.4.2 Evaluación por equipo de científicos (EPAM-2002)

También se basa en el trabajo de equipo, pero incorpora una inspección visual, colecta de información de campo y la interpretación de datos en el sitio de estudio. Es un método “bottom-up” derivado del EPAM (Thoms y Sheldon, 2002. Pp. 153-168).

Los pasos para llegar a un acuerdo sobre los caudales requeridos son:

1. Identificación de criterios manejo por un panel de expertos para 5 componentes principales del ecosistema: peces, árboles, micrófitos, invertebrados y geomorfología.
2. Aplicación de criterios para 3 elementos (régimen de caudales, hidrografía y estructura física) a 3 escalas espaciales.
3. Taller para elaborar una matriz que permita identificar las respuestas e impactos para cada componente del ecosistema con respecto a cada descriptor, a fin de relacionar el régimen de caudal con la respuesta.

2.3.4.3 Metodología de flujo incremental (The Instream Flow Incremental Methodology – 1976)

La metodología IFIM fue desarrollada por el U.S. Fish and Wildlife Service en colaboración con un equipo multidisciplinar, basándose en el conocimiento y descripción básicos de las interrelaciones existentes entre la cantidad de agua circulante y la cantidad de hábitat que genera en un tramo de cauce. Esta metodología la inició Bovee y Cochnauer (1977).

IFIM se ha desarrollado durante los últimos veinte años en la idea de proporcionar una herramienta para la gestión de los sistemas fluviales; creando un marco de evaluación, que permita ofrecer distintas soluciones alternativas en la gestión del agua. El análisis hidrológico es la base filosófica para comprender los límites de las aportaciones naturales de agua, haciendo gran énfasis en correlacionar el hábitat con la cantidad de agua y su evolución

temporal; de tal forma que, se pueda llegar a una negociación en la planificación de los usos del agua. Compartir el agua disponible durante los ciclos de sequía, contribuye a la compatibilidad entre los usuarios consuntivos y los medioambientales, permitiendo una rápida recuperación de las poblaciones acuáticas durante las épocas más favorables (Stalnaker et al., 1994, p. 99).

Se dice que esta metodología es de tipo adaptativa, ya que los distintos modelos que la componen pueden ser combinados para adaptarse a distintos escenarios de análisis (Pizarro 2004).

La metodología IFIM cuenta con cinco o cuatro fases fundamentales, dependiendo de los autores (Ministerio de Obras Públicas, Chile, 1998). Las 5 fases del IFIM son:

1. Identificación y diagnóstico del problema: La cual consta de dos componentes principales:

Análisis legal e institucional para identificar el problema y el contexto más probable para su resolución.

Análisis de los intereses de las distintas partes involucradas en un problema y la información necesaria para resolverlo.

2. Planificación del estudio: Un equipo multidisciplinario compara toda la información acumulada y debe llegar a un consenso sobre los objetivos, plazos de estudios, modelos apropiados e información requerida, presupuesto y responsabilidad para cada uno de los participantes.

3. Implementación del estudio: Incluye la recopilación de los datos necesarios, la calibración de los modelos a utilizar, y la verificación de los resultados obtenidos.

4. Análisis de alternativas: Se analizan las condiciones hidrológicas que definen un punto de referencia o línea base. Todos los participantes presentan alternativas de manejo del recurso hídrico.

5. Resolución de problemas: Se analizan las distintas alternativas que se dieron a conocer en la fase anterior y se llega a un acuerdo sobre cuál es la más conveniente para aplicar. Todas las alternativas son examinadas para conocer:

Efectividad: ¿Son los objetivos de cada una de las partes interesadas sostenibles?, ¿Existe la posibilidad de pérdida neta de hábitat debida a la implementación de esta alternativa?, ¿Cuáles son los costos y beneficios, en términos de hábitat utilizable, para esta alternativa?

Factibilidad Física: ¿Existen derechos de agua no satisfechos debido a la selección de esta alternativa?, ¿Existe la posibilidad de inundaciones (o fallas de agua prolongadas) debido a la implementación de esta alternativa?, ¿Existe suficiente agua disponible?

Riesgo: ¿Con cuánta frecuencia se producen riesgos de colapso o falla del sistema biológico a causa de la aplicación de esta alternativa?, ¿Es esta falla irreversible?, ¿Existen algunos planes de contingencia que puedan ser desarrollados?

Economía: ¿Cuáles son los costos y/o beneficios de cada alternativa?

IFIM es una metodología general, que permite abordar el problema de la gestión del agua con consideraciones hidrobiológicas, una parte fundamental de esta metodología es el modelo específico PHABSIM, diseñado para calcular un índice de la cantidad de hábitat disponible en función del caudal circulante.

2.3.4.4 Metodología de Bloque de Construcción (Building Block Methodology – BBM, 1999)

Es una metodología desarrollada en Sudáfrica por King y Brown (1999), es de aproximación “bottom-Up” (el caudal recomendado es estimado a partir de un flujo mínimo hacia valores más altos) y se construye bajo la premisa básica de que las especies fluviales dependen de elementos básicos del régimen de caudal, incluyendo caudales mínimos e inundaciones, para conservar la dinámica de sedimentos y la estructura geomorfológica del río (Castro y Carvajal, 2009, pp. 111-133). Está dirigida a un rango amplio de componentes del ecosistema como: calidad estética, dependencia social del río, beneficios económicos, áreas de interés científico, protección de características a nivel cultural, recreación, etc.

La BBM gira en torno a un grupo de expertos en hidrología, hidrogeología y geomorfología, así como de científicos en química, biología, entomología acuática, botánica y biología acuática, además de componentes sociales y económicos afectados directamente por el uso del recurso hídrico.

Los supuestos en los cuales se desarrolla esta metodología son:

- La biota presente en un río está adaptada a las fluctuaciones naturales en el caudal.
- Los caudales que no son característicos del río, provocan una perturbación atípica en el ecosistema y pueden cambiar su carácter.
- Para mantener la biota y funcionalidad del sistema se deben identificar los componentes principales del régimen de caudal e incorporarlos en el nuevo régimen.

Esta metodología se divide en tres fases que se describen a continuación:

Primera fase

En una primera fase de esta metodología se realiza un taller de expertos, para el cual se debe organizar la información disponible y se colecta la información necesaria. Incluye la identificación del área de estudio y selección de los tramos o puntos donde se centrará la mayor parte del estudio, y su caracterización en términos de su importancia a nivel local y regional que son:

- Componentes sociales (relación de las comunidades rurales con el ecosistema acuático).
- Geomorfológicos (diversidad de tramos en términos geológicos, forma del canal o biotopos físicos).
- Calidad de agua.
- Biológicos (distribución, características y requerimientos de las especies presentes de peces, comunidades vegetales de ribera e invertebrados acuáticos, así como otras especies presentes de mamíferos acuáticos, pájaros, reptiles, anfibios o macrófitas de interés que puedan existir).
- Hidrológicos (régimen natural y actual de caudales diarios).
- Hidráulicos (secciones transversales y curvas de gasto de los puntos seleccionados).

Se analizan las condiciones en las que se desea mantener el río en el futuro una vez esté gestionado a través de reuniones de trabajo con representantes de los organismos de la administración competentes en materia de aguas, bosques, turismo y conservación de la naturaleza y basándose en los datos recogidos y se genera un informe de recopilación de esta información.

Segunda fase

En la segunda fase se desarrolla taller de socialización y visitas de campo en la que se hace la observación al sistema. El grupo de trabajo (aproximadamente de 20 personas) trabaja a partir de la información disponible, cada especialista expone el caudal mínimo que desde su perspectiva tendría que circular cada

mes por el río y se define el régimen de caudales (caudales mínimos, máximos, de limpieza del cauce, etc.) que cumpla todos los puntos de vista considerados para satisfacer las condiciones objetivo. Así se obtienen un régimen de caudales mínimos y otro de máximos para un año “normal” hidrológicamente y para un año seco, constituyendo los cuatro bloques fundamentales de la metodología. Por último, se comprueban los resultados para ver si son ambientalmente aceptables y evitar cualquier incongruencia en los caudales propuestos de un tramo respecto a los de otro.

Los criterios empleados en esta fase para la selección del caudal ecológico son:

- El ciclo de vida de las especies faunísticas acuáticas (bentos, perifiton, peces y macrófitas).
- La supervivencia de especies ícticas que representen algún grado de comercialidad o sustento (pesca artesanal) para los habitantes de la región de estudio. El caudal ecológico en este caso deberá garantizar que las condiciones de hábitat suplan las necesidades de aquellas especies de peces que entran en el comercio local o que son usadas como alimento.
- Ciclos vegetativos de las especies riparias, es decir, que en caso tal que existan especies vegetales cuyo ciclo de vida tenga relación con la disponibilidad de agua, ésta deberá garantizarse para aquellos momentos del año en que el ciclo vegetativo se coordina con el ciclo hidrológico.
- Navegabilidad. Si en una región las rutas de desplazamiento incluyen las vías acuáticas, la selección de los caudales ecológicos mes a mes debe garantizar que este medio de transporte de importancia para la población pueda ser empleado.

Tercera fase

Determinación de actividades que vinculan los requerimientos del caudal con las actividades sociales y de ingeniería que tienen lugar en la cuenca. En esta fase son valorados los posibles conflictos con los usuarios. Además, en esta

etapa son descritos dos o tres estados posibles con más o menos agua para valorar cuáles serían las consecuencias en dichos estados. Para terminar, se presenta esta información a la comunidad y se llega a un régimen de caudal ecológico de manera holística.

2.3.4.5 Metodología respuesta río abajo por la transformación impuesta al caudal (Drift-Downstream Response to Imposed Flow Transformation 2003)

Desarrollada en Sudáfrica (Steward et al 2002), esta metodología nos brinda una perspectiva completa de las variaciones que ocurren río abajo en diferentes escenarios de regímenes de caudal.

El proceso dentro de la metodología DRIFT se divide en cuatro módulos, se necesita contar con un grupo extenso e interdisciplinario de profesionales:

1. Biofísico: Describe la naturaleza y la forma en que funciona el río y establece las bases necesarias para predecir los cambios relacionados con las modificaciones de caudal.
2. Sociológico: Se identifican los usos y costumbres asociados al río y la población que las practica. Se desarrollan las bases para predecir cuáles serían los impactos sociales de producirse ciertos cambios en el río.
3. Desarrollo de escenarios: Identifica los posibles escenarios y las consecuencias ecológicas, sociales y económicas, sobre los mismos de producirse una alteración en el caudal.
4. Económico: Los daños causados a la población en riesgo son evaluados desde el punto de vista financiero. Se toman en cuenta todos los escenarios posibles para calcular los costos de compensación y mitigación de los daños.

2.3.4.6 Benchmarking - Aproximación Topdown (2001-2002)

Se basa en principios similares al método Building Block. A diferencia del mismo, el caudal es determinado desde un flujo máximo aceptable, hacia valores menores (aproximación Top- Down). Su desarrollo se lo establece a través de un grupo multidisciplinario (Brizga et al, 2002).

Paso 1. Recopilación de información para el establecimiento de modelos conceptuales.

Paso 2. Identificación indicadores hidrológicos que son considerados ecológicamente relevantes.

Paso 3. Caracterización de los cauces (pueden ser regulados) escogidos dentro de un río como benchmark o de referencia.

Paso 4. Determinación de los impactos ecológicos en función del cambio en el caudal.

Con la aplicación de esta metodología se investiga cual es la variación del caudal antes de que el sistema sea degradado.

2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA EXISTENTE

En las tablas 2.13 a 2.18 se muestran los distintos métodos con la información requerida para su aplicación y las características generales para cada uno. Además en la tabla 2.19 se presenta un cuadro comparativo con los componentes del ecosistema fluvial considerado para cada metodología, la necesidad de datos, nivel de conocimiento, complejidad, recursos requeridos y el nivel de planificación que cada uno alcanza dentro de su desarrollo. Luego del análisis realizado para cada uno de las metodologías en la tabla 2.20 se presenta un resumen que incluye las ventajas y desventajas en la aplicación de las diferentes metodologías para el cálculo del caudal ecológico.

TABLA 2.13
METODOLOGIAS HIDROLÓGICAS

| MÉTODO | INFORMACIÓN REQUERIDA | CARACTERÍSTICAS GENERALES |
|---|----------------------------|--|
| Tennant | Caudales medios mensuales. | Corrientes sin estructura de regulación. Considera la estacionalidad (período seco y húmedo). El caudal es una fracción del caudal medio multianual. |
| Hoppe | Caudales medios diarios | Porcentajes fijos de la curva de duración de caudales medios diarios. Q_{17} , Q_{40} y Q_{80} . |
| Porcentajes Fijos | Caudales medios diarios | Serie significativa de datos (5años). Recomienda un caudal ecológico correspondiente a una fracción de un caudal. |
| Matthey | Caudales medios diarios | Recomienda un caudal mínimo que se establece en base al Q_{347} que es el caudal superado durante 347 días al año. |
| Legislación Suiza | Caudales medios diarios | Determina el caudal mínimo en función del Q_{347} , hace una distinción entre aguas piscícolas y no piscícolas. |
| Legislación Francesa | Caudales medios diarios | Determina el caudal mínimo como el 10% del caudal medio interanual calculado para un período mínimo de 5 años. |
| Legislación Asturiana | Caudales medios diarios | Determina el caudal a partir del Q_{347} y define zonas de interés y de protección según el área de la cuenca aprovechable. |
| Tessman | Caudales medios mensuales | Compara un porcentaje determinado del caudal medio interanual con el caudal medio mensual. |
| Montana | Caudales medios mensuales | Considera tres caudales mínimo, bueno y excelente calculados a partir del caudal medio interanual. |
| Arkansas | Caudales medios mensuales | Considera la estacionalidad al régimen de caudales y utiliza una fracción de los caudales medios mensuales multianuales, divide al año en tres períodos que corresponden a 50%, 60% y 70%. |
| Texas | Caudales medios mensuales | Considera períodos secos y húmedos. Calcula un porcentaje del caudal medio mensual 0,6 y 0,4 respectivamente |
| Aproximación por rangos de variabilidad | Caudales medios diarios | Considera una serie de datos de 20 años, a partir del establecimiento de objetivos de alteración de 33 índices (magnitud, duración y frecuencia). |
| Navarro | Caudales medios diarios | Determina el caudal en función de las poblaciones piscícolas y considera un valor fijo para todo el año. |
| Caudal Base de Mantenimiento | Caudales medios diarios | Determina un caudal básico independiente para cada año de la serie mediante variables de centralización móvil aplicadas a intervalos crecientes de datos consecutivos. |
| Caudal Base o Nueva Inglaterra | Caudales medios diarios | Se basa en un registro de caudales de 25 años. Calculado a partir de la mediana en el mes de agosto, que corresponde al registro más bajo. Divide al año en tres estaciones. |
| Caudal Medio Base | Caudales medios diarios | Determina el caudal dependiendo de la necesidad biológica/estación y en función del área de drenaje de la cuenca. |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 2.14
CONTINUACIÓN METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS

| MÉTODO | INFORMACIÓN REQUERIDA | CARACTERÍSTICAS GENERALES |
|---|--|--|
| Curva de Permanencia | Caudales medios diario/mensuales/anuales | Determina el caudal de ciertos rangos y el porcentaje de tiempo en el que cada uno de estos rangos es igualado o excedido Q_{95} , Q_{90} , Q_{50} |
| Caudal Mínimo con tiempo de recurrencia | Caudales mínimos diarios | Corresponde al valor que en promedio cada n años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de n días que representan los caudales promedios semanales. |
| NGPRP | Caudales medios diarios | Calculado a partir de un registro de 20 años, determinado a partir de la curva de duración de caudales considerando para meses secos Q_{90} y para meses húmedos Q_{50} |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 2.15
METODOLOGÍAS HIDRÁULICAS

| MÉTODO | INFORMACIÓN REQUERIDA | CARACTERÍSTICAS GENERALES |
|--------------------------------|--|--|
| Perímetro Mojado | Secciones transversales Coeficiente de rugosidad Pendiente longitudinal | Determina el perímetro mojado para varios caudales a los que les corresponde una velocidad media de la sección. El caudal óptimo es aquel que permite alcanzar el punto donde el incremento del perímetro mojado crece lentamente hasta llegar a la sección llena. |
| Múltiples Transectos | Medición directa de caudales (aforos líquidos y batimetrías). Tipo de sustrato. Cobertura vegetal. | Establece como criterio que el caudal ecológico es el caudal que ocupe el 10% del cauce, un caudal que evite estancamiento del agua, que asegure la irrigación de la vegetación ribereña o aquel que sea de mayor importancia. |
| Idaho | Levantamientos topográficos Secciones transversales Calado Tipo de sustrato | Determina el caudal de acuerdo al análisis de la información de campo recopilada y el objetivo propuesto de la especie de interés. |
| Simulación Hidráulica de White | Secciones transversales Calado Tipo de sustrato | Determina el caudal a partir de la relación algebraica existente entre el perímetro mojado y el caudal circulante, teniendo en cuenta las condiciones de freza, cría y migración de ciertas especies. |
| R2 Cross | Secciones transversales Calado Velocidad | Este método busca mantener el "estado ecológico de un tramo" |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 2.16
METODOLOGÍAS HIDROBILÓGICAS

| MÉTODO | INFORMACIÓN REQUERIDA | CARACTERÍSTICAS GENERALES |
|----------------------|--|--|
| Nehring | Sección transversal Calado Velocidad | El caudal mínimo será aquel que proporcione una profundidad media entre 12cm y b/50 donde b es la anchura del cauce. |
| Vasco | Secciones transversales Calado Velocidad Función de preferencia | El caudal se determina durante un período mínimo de tres años para cada mes y en función del orden fluvial. El método se basa en el mantenimiento de la diversidad ecológica por el número de taxones de la comunidad de macro invertebrados. |
| Fleckinger | Secciones transversales Calado Velocidad | Utiliza tablas empíricas donde se obtiene nuevas condiciones de velocidad, profundidad, ancho, etc. Se recomienda un caudal mínimo es el 30% del caudal de estiaje y del 7 al 9% del caudal medio anual. |
| García Dávila | Caudales medios diarios Secciones transversales Calado Velocidad | Se calcula el caudal mínimo en función de la existencia de poblaciones de salmónidos, se analizan las zonas susceptibles a quedar secas. Se calcula el caudal que rebosa las pozas aplicando fórmulas hidráulicas. |
| Análisis Incremental | Secciones transversales Calado Velocidad Coberturas Pendiente longitudinal Variables químicas pH, temperatura, nivel de oxígeno disuelto | Evalúa las secciones transversales, determina un número de celdas individuales, en la que se observa como varían los distintos parámetros físicos, químicos y de hábitat en función de la cantidad de agua que atraviesa. |
| Micro hábitats | Secciones transversales Calado Velocidad Coberturas Pendiente longitudinal Curvas de preferencia para diferentes estadios (desove, alevines, juveniles, adultos) | Este método establece para cada caudal circulante aplicando las curvas de preferencia la mayor o menor disponibilidad de hábitat que se traduce en una superficie útil a la disposición de los peces. |
| PHABSIM | Secciones transversales Calado Velocidad Coberturas Pendiente longitudinal Curvas de preferencia para diferentes estadios (desove, alevines, juveniles, adultos) Características físico-químicas | Para el cálculo del caudal se utiliza paquetes informáticos que permiten estudiar el comportamiento de una sección del tramo en estudio con distintos caudales bajo un análisis hidráulico, hidrológico y biótico. Entonces se obtiene mediante gráficos las curvas de variación de la superficie ponderada útil con el caudal circulante. |
| Thoms y Sheldom | Fotografías aéreas. Secciones transversales Calado Velocidad Coberturas Pendiente longitudinal Curvas de preferencia Registro de caudales diarios | Para recomendar el caudal se define la firma hidrográfica del río la misma que depende de la geomorfología, la conectividad longitudinal, los intercambios verticales, la conectividad lateral, caudales de mantenimiento, mínimos y estacionales. |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 2.17
CONTINUACIÓN METODOLOGÍAS HIDROBIOLÓGICAS

| MÉTODO | INFORMACIÓN REQUERIDA | CARACTERÍSTICAS GENERALES |
|---|---|--|
| Régimen estacional de caudales ecológicos | Registro de caudales (diaria, mensual o anual) Información batimétrica (cotas de inundación) Estudio de la cobertura vegetal ribereña Estudio de las especies faunísticas | Se estima el caudal cada mes / cada época del año y ajuste de la función de distribución estadística de la serie de caudales aforados o simulados del período considerado. |
| Índice de Calidad de Hábitat | Registro de caudales Velocidad Secciones transversales Calado Morfología del cauce Condición del sustrato Tipo de material del lecho Sedimentación de limos Atributos químicos: Nitratos, alcalinidad, fósforo, sólidos disueltos Atributos biológicos: vegetación ribereña y abundancia, diversidad u tipo de alimentos para peces | Se determina el caudal basándose en la hipótesis de que el mejor hábitat para la trucha está asociado con una producción de biomasa alta. Es un método empírico basado en el análisis estadístico de datos procedentes del río para obtener un conocimiento sobre los factores que rigen la calidad de hábitat de la trucha. |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 2.18
METODOLOGÍAS HOLÍSTICAS

| MÉTODO | INFORMACIÓN REQUERIDA | CARACTERÍSTICAS GENERALES |
|--------------------------------------|---|---|
| Grupo de Expertos | Ecología de peces Macro-invertebrados Geomorfología | El caudal se estima a través de los criterios de un grupo de expertos que analizan los datos de campo y establecen el caudal. Utiliza el método "bottom up" |
| Evaluación por Equipo de Científicos | Inspección visual del área de estudio: peces, árboles, macrófitas, invertebrados y geomorfología. Régimen de caudales Hidrografía y estructura física | Mediante esta evaluación se elabora una matriz que permite identificar las respuestas e impactos para cada componente del ecosistema. |
| IFIM | Identificar el problema Un equipo multidisciplinario Información requerida por PHABSIM para la modelación. | Es una herramienta de gestión, que permite ofrecer distintas soluciones alternativas a la gestión del agua. Calcula el índice de la calidad de hábitat disponible en función del caudal circulante a través de la herramienta PHABSIM e incluye la participación de los diferentes actores que forman parte de la gestión del recurso hídrico. |
| Bloques de Construcción | Régimen de caudales Hidrología Hidrogeología Química Biología Entomología acuática Botánica Biología acuática Componente social y económico | Requiere de un grupo de expertos multidisciplinarios. Esta metodología tiene tres fases, una vez que se recolecta la información disponible y necesaria. 1.- Taller de expertos 2.- Taller de socialización y visitas de campo 3.- Determinación de actividades (sociales y de ingeniería) que vinculan los requerimientos de caudal. |
| DRIFT | Régimen de caudales Hidrología Hidrogeología Componente social y económico | Requiere de un grupo de expertos multidisciplinarios. Se divide en cuatro fases: 1.- Analiza el comportamiento del río 2.- Identifican los usos y costumbres asociados al río 3.- Desarrollo de escenarios 4.- Identifica los riesgos evaluados desde el punto de vista financiero, |
| Benchmarking | Régimen de caudales Hidrología Hidrogeología Componente social y económico | Requiere de un grupo de expertos multidisciplinarios. Se divide en cuatro fases: 1.- Establecimiento de modelos conceptuales 2.- Indicadores hidrológicos 3.- Caracterización del cauce 4.- Determinación de los impactos ecológicos. |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

**TABLA 2.19
COMPARACIÓN DE LOS CUATRO TIPOS DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS**

| ENFOQUE | COMPONENTE DEL ECOSISTEMA FLUVIAL CONSIDERADOS | NECESIDAD DE DATOS | NIVEL DE CONOCIMIENTO NECESARIO | COMPLEJIDAD | RECURSOS (Tiempo, costo, capacidad técnica) | NIVEL DE APLICACIÓN |
|----------------|---|--|--|------------------|---|---|
| HIDROLOGICO | Todos los ecosistemas | Bajo-Moderado Trabajo de gabinete Registros históricos de caudales Uso de datos ecológicos | Bajo-Moderado -Hidrología -Algo de Ecología | Bajo Moderado | Bajo Moderado | Planificación de recursos hidrológicos o dentro de otra metodología |
| HIDRAULICO | Hábitat en cursos de agua para especies de interés | Bajo-Moderado Trabajo de gabinete y campo Registros históricos de caudales Variables hidráulicas secciones. Necesidades hábitat-caudal | Moderado -Hidrología -Modelación hidráulica -Algo de ecología | Bajo Moderado | Bajo Moderado | Planificación de recursos hidrológicos con negociación o sin ella |
| HIDROBIOLOGICO | Hábitat en cursos de agua para especies de interés. Pueden considerarse forma del cauce, calidad de agua, vegetación riparia, vida silvestre, calidad de agua | Moderado-Alto Trabajo de gabinete y campo Registros históricos de caudales. Numerosas secciones transversales con múltiples variables hidráulicas Datos de idoneidad del hábitat para especies | Moderada-Alto -Hidrología -Modelación avanzada hidráulica y hábitat -Ecología (en hábitat físico necesidad de caudal de especies de interés | Moderado Alta | Moderado Alta | Planificación de recursos hidrológicos; gran escala; ríos de importancia estratégica, negociación sobre intereses opuestos. |
| HOLLISTICOS | Todo ecosistema (mayoría de componentes). Pueden considerarse aguas subterráneas, humedales, estuarios, llanuras de inundación, dependencia social sobre el ecosistema, componentes en el curso de agua y riparios. | Moderado-Alto Trabajo de gabinete y campo Registros históricos de caudales. Numerosas secciones transversales con múltiples variables hidráulicas Datos biológicos sobre caudales y hábitat relacionados con todos los requerimientos de la biota y el ecosistema. | Moderada-Alto -Hidrología -Modelación avanzada hidráulica -Nivel de experto en todos los componentes del ecosistema -Puede requerir de conocimiento de aspectos sociales y económicos. | Moderado Alta | Moderado Alta | Planificación de recursos hidrológicos; gran escala; ríos de importancia estratégica o para conservación, negociación sobre intereses opuestos. |

FUENTE: (Claudio y Martínez, 2013, pp. 56-58; Jamett y Rodrigues, 2005, p.13). ELABORACIÓN: Verónica Yépez.

TABLA 2.20
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA
DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

| METODOLOGÍAS | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|----------------|--|--|
| HIDROLÓGICO | <p>Su uso es rápido, facilidad de cálculo. Económicos en su aplicación. Registran el comportamiento histórico de las corrientes. Los resultados de estos métodos pueden ser empleados para las metodologías holísticas</p> | <p>No tienen en cuenta en estudio de las características físicas del cauce y el componente biológico, esto puede ocasionar que el caudal sea subvalorado o sobrevalorado de acuerdo con las características de los ecosistemas. Estos métodos fueron desarrollados para sitios específicos, su aplicación debe realizarse con precaución en las regiones que difieren notablemente a las de origen.</p> |
| HIDRÁULICO | <p>Recopilación limitada de información nueva. Permite establecer una conexión entre las características hidráulicas de una corriente (perímetro, calado, sustrato, etc.) y el bienestar del ecosistema. Estos métodos son específicos y dependen de las condiciones del lugar de selección de las secciones transversales.</p> | <p>Implican mayor inversión económica que los métodos hidrológicos. Se asume que a través de variables como calado, perímetro mojado y velocidad principalmente se pueden determinar condiciones óptimas para las especies del ecosistema acuático lo cual es sesgado. Requiere de la localización de secciones transversales representativas de la corriente en estudio lo cual puede resultar crítico para los resultados que se obtengan.</p> |
| HIDROBIOLÓGICO | <p>Permite conocer la respuesta de una especie a las variaciones de caudal. Sirven como herramientas específicas de estudio para especies de fauna/flora. Interrelacionan las características hidráulicas y ecológicas de las corrientes en estudio. Pueden considerarse como una herramienta de evaluación de impacto.</p> | <p>La recopilación de datos hidráulicos y ecológicos demanda tiempo y costo; requiere de trabajo interdisciplinario lo que implica tiempos de trabajo prolongados. La especificidad en diferentes áreas del conocimiento en ocasiones puede ser una restricción en el trabajo. Los resultados se limitan a las especies bajo estudio: no se pueden generalizar los resultados y la selección de la especie en estudio es crítica. Al considerarlos como una herramienta de planeación y conservación implica realizar estudios extensos y recurrentes. El uso de la curva de preferencia de las especies objetivo puede llegar a ser un problema en países en donde esta información no está disponible.</p> |
| HOLÍSTICOS | <p>Flexibles, robustos e inclusivos. Más completos y dirigidos a explorar opciones. Incorporan modelos de simulación hidrológica, hidráulica y hábitat, así como diferentes profesiones que trabajan de manera interdisciplinaria, lo que implica un trabajo de mayor cobertura con el objetivo de buscar las condiciones óptimas de los ecosistemas acuáticos no solo tomando en cuenta las condiciones físicas, biológicas sino también las sociales y económicas. Estas metodologías siguen una secuencia organizada y bien estructurada que facilitan su desarrollo.</p> | <p>Los resultados pueden variar entre equipos de expertos. Podría no llegarse a un consenso. Requiere de un programa completo de estudio y recursos. Requiere gran cantidad de información de todas las áreas del conocimiento involucradas para que los profesionales expertos hagan las recomendaciones del caso. Para el desarrollo de estos métodos es necesario contar con profesionales de: hidrología, biólogos, sociólogos, etc, lo cual implica que en ocasiones resulte complicado reunir un equipo de esas características.</p> |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez.

2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En las últimas décadas la presión sobre los recursos hídricos ha aumentado es así que en los cuerpos de agua se intenta establecer el caudal ecológico el mismo que para su evaluación requiere entender la cadena de eventos que tiene que ver desde el cambio climático hasta la hidrología, hidráulica, química, geomorfología de los cauces con la subsecuentes repercusiones ecológicas y socioeconómicas.
- La evaluación de los caudales ecológicos se lleva a cabo tomando en cuenta no solo el componente científico sino también la parte social que tiene un papel medular, la determinación de este no responde a un único caudal correcto para el río, la respuesta depende de las necesidades de la comunidad.
- En la actualidad hay más de 200 métodos para evaluar los caudales ecológicos, algunos son de muy rápida aplicación y no es necesario un análisis adicional, mientras que otros necesitan o requieren años de trabajos de campo y especialistas en diversas disciplinas. La elección del método dependerá de: los recursos disponibles para el análisis, importancia del río y complejidad del sistema.
- La falta de información y de recursos puede llegar a ser un obstáculo en la determinación del caudal ecológico. Es necesario empezar a restaurar parte de la variabilidad natural de los ríos pues a medida que pasa el tiempo los recursos hídricos sufren mayor presión y la biodiversidad está en peligro.
- El propósito de los caudales ecológicos es conservar al menos algunos patrones naturales de los flujos a lo largo del río, de modo que los diferentes actores que forman parte del ecosistema puedan subsistir y continuar utilizando el recurso corriente abajo. Es decir lograr un uso razonable de los recursos hídricos.

CAPÍTULO 3

CRITERIOS Y BASES PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLOGICO

3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a las nuevas políticas que se desarrollan a nivel mundial para asegurar prácticas sostenibles y responsables en las últimas décadas se han planteado cada vez nuevos cuestionamientos sobre ¿Cuál es el caudal ecológico necesario para mantener la vida no solo en el cauce sino también las condiciones ecológicamente sanas en las riveras?

Es así que existe un sin número de metodologías y métodos desarrollados para evaluar el caudal ecológico que reflejan un ilimitado ingenio de los profesionales en ciencias hídricas que obedece a una variedad de escenarios diferentes que van desde ríos (productivos económicamente) de los países desarrollados en donde hay gran preocupación pública y dinero disponible para atender los problemas medio ambientales hasta los ríos urbanos degradados y contaminados de los barrios pobres del tercer mundo.

Entonces en un país como el nuestro es importante empezar la planificación de los recursos hídricos tomando en cuenta lo que establece la Constitución del Ecuador en el Art. 14 “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumakkawsay*. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas...”

En base a los diferentes métodos analizados en el capítulo anterior la presente investigación tiene como objetivo establecer los criterios para la determinación del caudal ecológico en ríos altoandinos tropicales.

3.2 EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES FÍSICAS SOBRE LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO.

A continuación se presentan las variables que intervienen en la determinación del caudal ecológico de acuerdo con las metodologías presentadas en el capítulo anterior. Se pretende presentar una guía para la evaluación de las variables físicas sobre la estimación del caudal ecológico.

3.2.1 VARIABLES HIDROLÓGICAS

3.2.1.1 Caudales

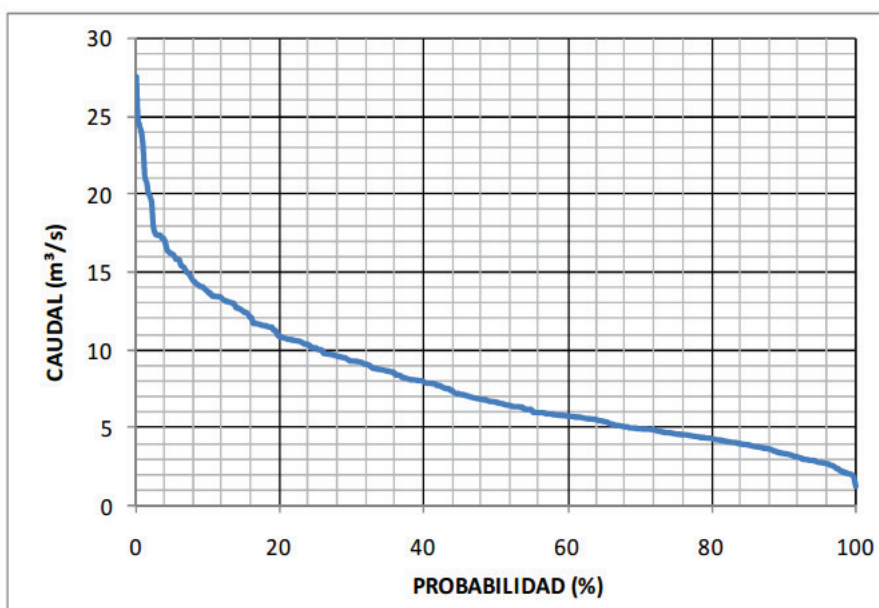
Para la determinación del caudal ecológico dentro de las metodologías hidrológicas es necesario disponer de un registro de caudales medios sean estos diarios o mensuales con períodos representativos de al menos 20 años en la mayoría de los casos.

El análisis se lo realiza para la mayoría de los casos mediante la curva de duración general (CDG), que consiste en la contabilización de la recurrencia de los valores de caudales dentro de determinados rangos, con el fin de calcular las frecuencias relativas y absolutas de las mismas (Villacis y Andrade, 1985). Esta curva también llamada curva de permanencia o persistencia de caudales, puede ser definida con caudales diarios, mensuales y anuales. Es la representación gráfica en orden decreciente de los caudales observados (Q_i), asociados a una frecuencia o duración que suele expresarse en porcentaje. La duración representa el intervalo de tiempo durante el cual los caudales (Q_i) son iguales o superiores a un valor específico Q_j . En la curva de duración general (CDG), constan los caudales con su correspondiente probabilidad de ser igualados o excedidos (Monsalve, 1999, p.380).

El porcentaje de ocurrencia se calcula dividiendo cada uno de los números de orden (m) para el número total de datos (n), y se multiplica este valor por 100 (Almeida, 2010, p. 219).

La Curva de Duración General se obtiene mediante un gráfico de dispersión, ubicando en el eje de las abscisas las probabilidades de ocurrencia y en el eje de las ordenadas los caudales como se puede observar en la figura 3.1.

FIGURA 3.1
EJEMPLO CURVA DE DURACIÓN GENERAL



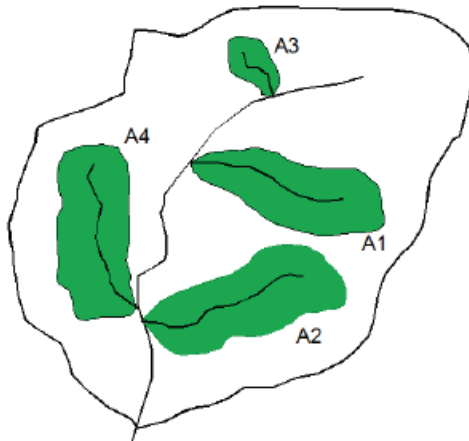
FUENTE: Almeida, 2010, p. 201

Información insuficiente

Cuando la cuenca en estudio no posee datos de caudales, existe un método que permite relacionar las cuencas hidrográficas similares, dependiendo de las características fisiográficas e hidrográficas de las mismas, existen métodos alternos de cálculo y que tienen como requisitos la afinidad entre cuencas (Instituto de Hidrología España-Unesco, 1981).

En la figura 3.2 se muestra el esquema de cuencas vecinas.

FIGURA 3.2
ESQUEMA DE CUANCAS VECINAS



FUENTE: Almeida, 2010, p. 192

Siendo la cuenca 1, similar en condiciones hidrológicas a la cuenca 2 (cuenca de interés); para la cuenca 2 que no posee datos, es posible deducir su propia curva suponiendo que la relación Q/A , para cada porcentaje del tiempo es igual a la de la cuenca con datos de caudal, siendo A el valor correspondiente al área de drenaje (Almeida, 2010, p.193).

$$Q_2 = \frac{A_2}{A_1} * Q_1 \quad (3.1)$$

En donde,

A_1 = área de drenaje de la cuenca 1, (km^2);

Q_1 = caudal de la cuenca 1, (m^3/s);

A_2 = área de drenaje de la cuenca 2, (km^2);

Q_2 = caudal de la cuenca 2, (m^3/s).

Se recomienda aplicar el método siempre y cuando la relación entre el área de la cuenca más grande y el área de la cuenca más pequeña no sea mayor a 1.5.

Una variación de este método en el cual se tiene cuencas con características similares es tener en cuenta la diferencia en la precipitación de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_2 = \frac{P_2}{P_1} * \frac{A_2}{A_1} * Q_1 \quad (3.2)$$

Donde,

P_1 = precipitación media de la cuenca 1;

P_2 = precipitación media de la cuenca 2.

Para el cálculo de las precipitación media de la cuenca se puede emplear los métodos de los polígonos de Thiessen o el método de las isoyetas, considerando las restricciones que cada uno de estos métodos tienen en su aplicación.

3.2.1.2 Característica físico – geográficas de las cuencas de drenaje

El estudio sistemático de los parámetros físicos y geográficos de las cuencas es de gran utilidad para la determinación del caudal ecológico, pues con base en ellos se puede lograr la transferencia de información de un sitio a otro con escasa información. La información que se presenta a continuación tiene como base el documento Hidrología en la ingeniería de Monsalve (1999), Fundamentos de hidrología se superficie Aparicio (1999) y el Instructivo de procesamiento de información hidrometeorológica Almeida (2010).

3.2.1.2.1 Área de drenaje

El área de la cuenca es la característica morfométrica e hidrológica más importante. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

3.2.1.2.2 Perímetro

El perímetro es la longitud de la línea divisoria de aguas de la cuenca, es un parámetro importante que en conjunto con el área de drenaje permite inferir sobre la forma de la cuenca.

3.2.1.2.3 Forma de la cueca

Esta característica es importante pues se relaciona directamente con el tiempo de concentración de la cueca y para definir este parámetro se utilizan:

- Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad (k_c)

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo equivalente al área de la cuenca (Guerrero, 2011 p. 11).

$$K_c = 0.282 * P * A^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

K_c = coeficiente de compacidad;

P = perímetro de la cuenca, (km); y,

A = área de drenaje de la cuenca, (km^2).

Entre 1 y 1.25 corresponde a una forma redonda a oval redonda

Entre 1.25 y 1.5 corresponde a una forma redonda a oval oblonga

Entre 1.5 y 1.75 corresponde a una forma oval oblonga a rectangular oblonga

- Factor de forma (K_f)

Es la relación que existe entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial hace referencia a la diferencia existente entre la cabecera y la desembocadura del curso más largo del agua (Almeida, 2010, p. 56).

El ancho medio, se obtiene dividiendo el área de la cuenca, para la longitud axial de la misma.

$$K_f = B/L \quad (3.4)$$

Donde,

B = ancho medio de la cuenca en (km); y,

L = longitud axial de la cuenca (km).

Como se tiene que $B = A/L$, la ecuación se resumen en:

$$K_f = A/L^2 \quad (3.5)$$

A = área de la cuenca, (km^2).

Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecientes rápidas y muy intensas, a lentas y sostenidas, según su comportamiento, si tiende hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente. Un valor superior a la unidad dará el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y como consecuencia una tendencia a concentrar escurrimiento de una lluvia intensa fácilmente grandes crecidas.

- Índice de alargamiento

Es la relación entre la longitud axial y el ancho máximo de la cuenca. Aquellas cuencas que registran valores mayores a uno presentan un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada. Este índice permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva o de arrastre.

$$I_a = L/B \quad (3.6)$$

Donde,

B = ancho medio de la cuenca en (km); y,

L = longitud axial de la cuenca (km).

- Índice asimétrico

Es la relación del área de las vertientes mayor y menor las cuales son separadas por el cauce principal. Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución de las red de drenaje, pues si se tiene un índice mucho mayor a 1 se observará sobre la cuenca que el río principal estará recargado a una de las vertientes, lo cual implica una heterogeneidad en la distribución de la red de drenaje aumentando la descarga hídrica de la cuenca a esta vertiente, incrementando en cierto grado los niveles de erosión a causa de los altos eventos de escorrentía superficial.

$$I_{as} = \frac{A_{may}}{A_{men}} \quad (3.7)$$

I_{as} = índice asimétrico (adimensional);

A_{may} = vertiente mayor (km^2); y,

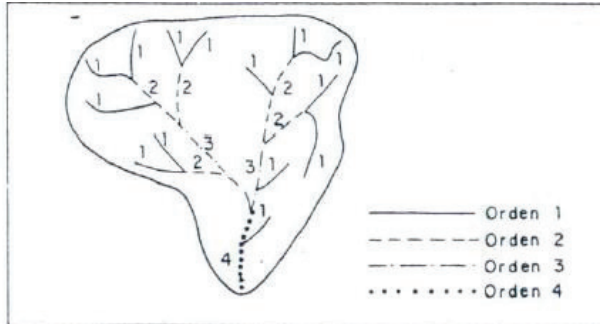
A_{men} = vertiente menor (km^2).

3.2.1.2.4 Orden de la cueca

El orden de las corrientes de agua, hace referencia al grado de ramificación o bifurcación dentro de la cuenca. (Ver Figura 3.3).

- Corrientes de primer orden: pequeños canales sin tributarios
- Corrientes de segundo orden: es la unión de dos corrientes de primer orden.
- Corrientes de orden n+1: cuando dos corrientes de orden n se unen

FIGURA 3.3
ORDEN DE LA CUENCA



FUENTE: Monsalve 1995 (cit. por Almeida, 2010, p. 57)

3.2.1.2.5 Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca con su área total (Ver Figura 3.4)

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

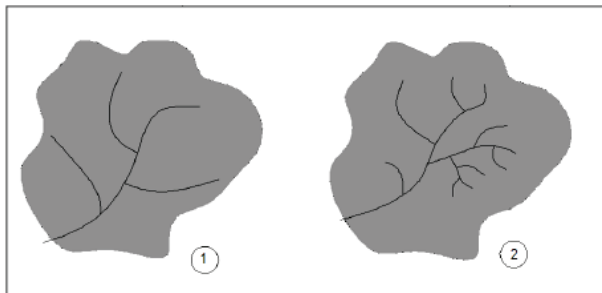
$$D_d = L/A \quad (3.8)$$

Donde,

L = longitud total de las corrientes de agua, (km); y,

A = área de la cuenca, (km²).

FIGURA 3.4
DENSIDAD DE DRENAJE



1.- Baja densidad de drenaje 2.- Alta densidad de drenaje
FUENTE: Almeida, 2010, p. 58

La densidad de drenaje toma valores de 0,5 km/km² para cuencas con drenaje pobre hasta 3,5 km/km² para cuencas con muy buen drenaje. (Monsalve, 1995)

3.2.1.2.6 Sinuosidad de las corrientes de agua

Es la relación que existe entre la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce, L, y la longitud del valle del río principal medida en línea curva o en línea recta L_T.

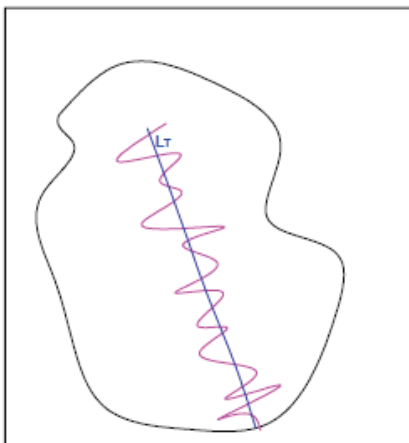
$$S = L/L_T \quad (3.9)$$

Donde,

L = largo del cauce principal, (km); y,

L_T = longitud del río principal medido en línea recta, (km).

FIGURA 3.5
SINUOSIDAD DE LAS CORRIENTES



FUENTE: Almeida, 2010, p. 59

Este parámetro es útil para determinar la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente. Un valor de S menor o igual a 1,25 indica una baja sinuosidad y se define entonces como un río con alineamiento "recto" (Monsalve, 1995).

3.2.1.2.7 Características del relieve de la cuenca

- Pendiente de la cuenca

Esta característica controla en gran medida la velocidad con la que se da la escorrentía superficial, y afecta por ende, el tiempo que tarda el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las cuencas.

La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, su delimitación es importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de la capas de suelo (erosión o sedimentación), puesto que, en zonas de altas pendientes se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión; mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

El método de las tangentes se considera uno de los métodos más completos. Consiste en determinar la distribución porcentual de las pendientes de los terrenos por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curva de nivel. Se recomienda tomar una muestra de al menos 40 puntos. Ver Figura 3.6.

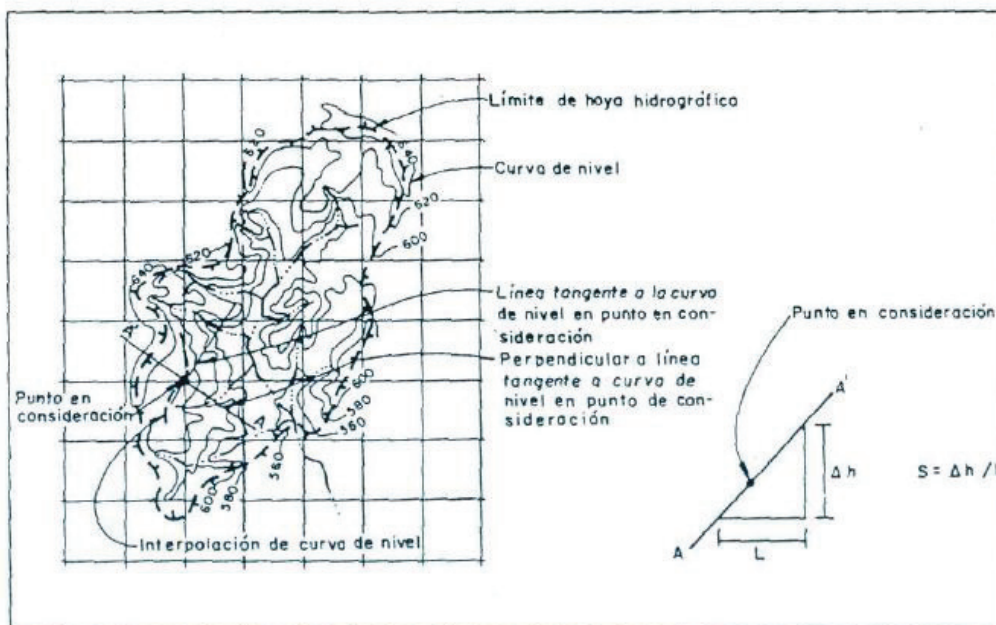
La fórmula que debe aplicarse para el cálculo:

$$S_{\text{cuenca}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (3.10)$$

S_{cuenca} = pendiente para cada uno de los puntos considerados; y,

n = número de puntos considerados.

FIGURA 3.6
PENDIENTE DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA. MÉTODO DE LAS TANGENTES



FUENTE: Monsalve 1995 (cit. por Almeida, 2010, p. 60)

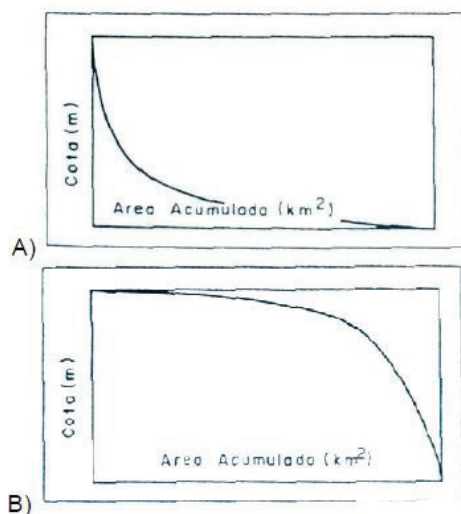
- Curva hipsométrica

Constituye una síntesis o representación gráfica del relieve representado por las curvas de nivel y ponderar los elementos de superficie correspondiente a los diferentes intervalos de altitud mediante una función no lineal de la pendiente media en cada intervalo. Los datos de elevación son significativos, sobre todo para considerar la acción de la altitud en el comportamiento de la temperatura y la precipitación.

La curva hipsométrica refleja con precisión el comportamiento global de la altitud de la cuenca y la dinámica del ciclo de erosión; a partir de los datos de la curva hipsométrica se puede conocer la altura media de la cuenca que se emplea en parámetros como el coeficiente de masividad u orográfico.

En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de curvas hipsométricas. En la curva A se tiene una cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas, mientras que en la B es posible observar una cuenca con valles profundos y altiplanos.

FIGURA 3.7
EJEMPLO DE CURVAS HIPSONÉTICAS



FUENTE: Monsalve 1995 (cit. por Almeida, 2010, p. 63)

- Cota media de la cuenca

Este parámetro se considera importante por la influencia que tiene sobre la precipitación, sobre las pérdidas de agua por evaporación y transpiración y consecuentemente sobre el caudal medio (Monsalve, 1995).

Se aplica la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{cotamediaintervaloi} * \text{área}_i)}{\sum_{i=1}^n (\text{área}_i)} \quad (3.11)$$

Donde,

n = número de intervalos de clase.

- Pendiente del cauce principal

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua dependen de la pendiente de los canales fluviales (Monsalve, 1995). Cuando las pendientes son más pronunciadas la velocidad aumenta. Este índice proporciona una idea sobre el tiempo de recorrido del agua a los largo del perfil longitudinal el río.

Incide en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos por cuanto está relacionado con la velocidad del agua.

Debido a que el tiempo de recorrido varía en toda la extensión del curso de agua, es necesario dividir a la corriente en varios tramos rectilíneos. Se recomienda un mínimo de 8 tramos que sean representativos de acuerdo al cambio de pendiente de la corriente presente.

Se aplica la siguiente fórmula

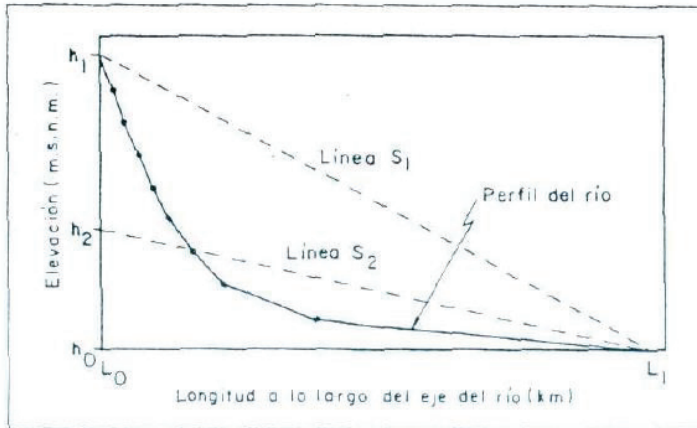
$$S_{\text{cauce}} = \left(\frac{\sum l^n}{\sum \frac{l^n}{S_i^{1/2}}} \right)^2 \quad (3.12)$$

Donde,

l'' = distancia inclinada entre las cotas del tramo,

s_i = pendiente por segmento

FIGURA 3.8
PENDIENTE DE LA CORRIENTE PRINCIPAL



FUENTE: Monsalve 1995 (cit. por Almeida, 2010, p. 67)

- Coeficiente de masividad

Es la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. Permite diferenciar cuencas de igual altura media pero de relieve distinto, aunque pueden dar valores iguales para cuencas distintas.

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m.s.n.m)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}} \quad (3.13)$$

Este coeficiente de masividad puede tomar los siguientes valores y se pueden definir tres rangos:

TABLA 3.1
CLASES DE VALORES DE MASIVIDAD

| Rangos de Km | Clases de Masividad |
|--------------|-------------------------|
| 0 - 35 | Moderadamente montañosa |
| 35 - 70 | Montañosa |
| 70 - 105 | Muy montañosa |

FUENTE: Reyes, Ulises, y Carvajal, 2010 (cit. por Consuegra, 2013, p. 65)

- Coeficiente orográfico

Es la relación entre el cuadrado de la altitud media del relieve y la superficie proyectada sobre un plano horizontal. Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, crece mientras que la altura media del relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Por esta razón si el valor del coeficiente orográfico es menor que 6 representa un relieve poco accidentado propio de cuencas extensas y de baja pendiente; y si el valor es mayor que 6, es un relieve accidentado.

Se calcula:

$$C_o = \frac{h^2}{A} \quad (3.14)$$

Donde:

C_o = coeficiente orográfico (adimensional);

h = altitud media del relieve (km); y,

A = área de la cueca (km^2).

3.2.2 VARIABLES HIDRÁULICAS

Los ríos han sufrido y sufren importantes modificaciones en su régimen de caudal, debido a que las cantidades de agua que recibe de las precipitaciones no permanecen constantes en el tiempo, es decir varían de acuerdo a la época del año, por lo tanto están sujetos a modificaciones en su estructura, composición y funcionamiento (Simonson, Lyons, y Kanehl, 1993, p. 36).

Dentro de los parámetros a analizar esta la velocidad de la corriente, el calado, la morfología del cauce, características del lecho y la temperatura. La unidad básica de estudio para la determinación de los caudales ecológicos que utiliza la metodología hidráulica es la sección transversal o transecto.

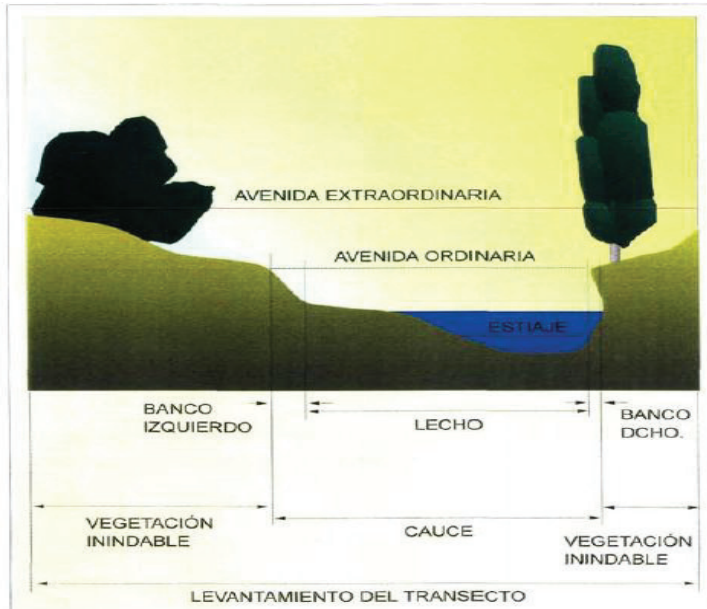
3.2.2.1 SECCIÓN TRANSVERSAL O TRANSECTO

Es una línea determinada por dos puntos opuestos situados en ambas orillas, tomada como referencia para la medida de diversas características del cauce y del hábitat. Esta línea es transversal al cauce, permite repetir las medidas en un mismo lugar en diferentes épocas o condiciones. Las secciones transversales o transectos deben ser los representativos de las características de anchura, calado sustrato y hábitat de un tramo del río en estudio (Herrington y Durham, 1967, p. 12; Platts, 1974, p. 199).

La separación entre las secciones transversales y la cantidad dependen de la mayor o menor heterogeneidad del tramo. Se recomienda ubicarlos en el lugar del cauce en que se produzcan un cambio del ancho o de la profundidad media o en el sustrato o en la cobertura.

En la figura 3.9 se muestran la diferentes parte de la sección transversal de un cauce en función del caudal que por el circula.

FIGURA 3.9
SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CAUCE FLUVIAL



FUENTE: Mayo, 2000, p. 70

Como se puede observar en la figura se distinguen dos zonas:

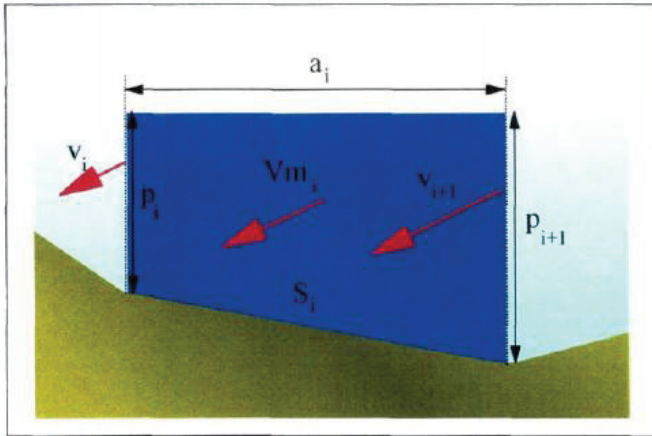
- **Lecho:** parte inferior del cauce y normalmente cubierta por agua, pudiendo emerger alguna zona en época de aguas bajas. El material puede ser sedimentario o roca viva.
- **Bancos laterales:** son las partes laterales del cauce que incluyen ambas orillas. Contienen la agua lateralmente, siendo inundadas periódicamente por las avenidas ordinarias, generalmente se observa un cambio en material respecto al lecho. El límite de ambos bancos laterales, define el nivel de aguas máximas correspondiente a las avenidas ordinarias.

3.2.2.2 VELOCIDAD MEDIA Y CAUDAL

Partiendo de una orilla y avanzando por la sección transversal, en cada vertical de separación correspondiente a dos celdas contiguas, se toman las medidas de profundidad o de velocidad de la corriente (mediante un micro-molinete). La

velocidad media asignada a la celda, es la media de las velocidades medidas en cada uno de los extremos (Ver Figura 3.10).

FIGURA 3.10
CELDA PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD MEDIA Y EL CAUDAL



FUENTE: (Mayo, Matín, 2000)

Para el cálculo del caudal aplicamos la siguiente fórmula:

$$Q = v * A \quad (3.15)$$

Donde:

Q = caudal;

v = velocidad, (m/s);

A = área, (m²).

Siendo el caudal que pasa por la sección la suma de todos los caudales individuales. De la misma forma el área total será la suma de las áreas elementales.

3.2.2.3 Coeficiente de rugosidad

Dada la complejidad del escurrimiento en cauces fluviales, es necesario asumir algunas simplificaciones de modo que el problema sea abordable. Existen

ecuaciones complejas para definir el flujo en el cauce, sin embargo, internacionalmente, se han asumido fórmulas más sencillas que proporcionan la velocidad media V_m . Estas fórmulas tienen en común la presencia de un factor de freno al escurrimiento, que cuantifica la rugosidad debido a la composición y tamaño de las partículas del lecho, irregularidades del canal, alternancia de pozos y rápidas y a los cambios de dirección.

Así tenemos la fórmula de Chezy desarrollada en 1769:

$$V_m = c * \sqrt{y * I} \quad (3.16)$$

Donde,

V_m = velocidad media;

c = coeficiente de rugosidad;

y = calado;

I = pendiente longitudinal.

También la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$V_m^2 = \frac{8 * g * y * I}{f} \quad (3.17)$$

Donde,

V_m = velocidad media;

g = gravedad;

y = calado;

I = pendiente

f = factor de fricción

La ecuación de Manning fue desarrollada en 1889, es la de más amplia utilización, fue descrita para evaluar el flujo uniforme en canales y su expresión es la siguiente:

$$V_m = \frac{R^{2/3} \cdot I^{1/2}}{\eta} \quad (3.18)$$

Donde,

V_m = velocidad media;

R = radio hidráulico (área de la sección / perímetro mojado);

I = pendiente;

η = coeficiente de rugosidad;

Existen relaciones entre estas tres ecuaciones, de tal forma que: $\eta = \frac{R^{1/6}}{c}$ y

$$f = \frac{8 \cdot g}{c^2} \text{ con lo que: } f = \frac{8 \cdot g \cdot \eta^2}{R^{1/3}}$$

El coeficiente de rugosidad puede asignarse directamente, utilizando valores previamente obtenidos para cauces similares o similares condiciones de escurrimiento; también se los puede obtener utilizando los valores de las tablas que existen en la bibliografía.

El sustrato tiene una gran influencia en la rugosidad, siendo, de forma general quien produce mayor freno al escurrimiento junto con la presencia de macrofitas.

Si la profundidad media es bastante mayor que el diámetro medio de las partículas, la influencia del sustrato en el escurrimiento es mínima; sin embargo si la profundidad es somera y los materiales del sustrato se introducen en las líneas de corriente, la resistencia al escurrimiento es mucho mayor. Las grava, bloques u otros ofrecen resistencia al escurrimiento, particularmente cuando la

profundidad media es menor que tres veces el diámetro de la partícula del sustrato (Newbury y Gaboury, 1993, p. 256).

Para cuantificar la influencia del sustrato sobre la rugosidad, es preciso determinar la composición granulométrica. De la curva granulométrica podemos obtener el d_{50} , aquel diámetro por debajo del cual se encuentra acumulado el 50% de las partículas de la muestra. Este diámetro es significativo, habiéndose obtenido algunas relaciones con la rugosidad (Mayo, 2000. P. 86).

En función de la profundidad de la lámina y del diámetro medio de las partículas del sustrato d_{50} podemos distinguir tres casos:

Caso I: la profundidad (calado) es mayor que tres veces el d_{50} (m). Strickler en 1923 estima una relación directa para la obtención de la rugosidad:

$$\eta = 0,04 * d_{50}^{1/6} \quad (3.19)$$

De aplicación en cauces con sedimentos finos (arenas, gravillas, partículas aplanadas). Barnes (1967) da algunos valores comprobados del coeficiente de rugosidad en función del tipo de sustrato o la profundidad. La rugosidad puede asignarse directamente utilizando los datos de la siguiente tabla.

TABLA 3.2
COEFICIENTES DE RUGOSIDAD SEGÚN BARNES (1976)

| Tipo de cauce | η |
|---|--------|
| Limpio, recto, materiales finos en el lecho con algunos bloques aislados y dispersos. | 0,03 |
| Limpio, algo sinuoso, gravas y algunos bloques, pozos y rápidos | 0,04 |
| Pozas profundas | 0,05 |
| Vegetación en el cauce, ramas o raíces dentro del agua | 0,08 |

FUENTE: Mayo, 2000, p. 87

Caso II: la profundidad es menor que tres veces el d_{50} . En este caso, no se puede aplicar la aproximación de Strickler 1923, ya que el flujo es interrumpido por los materiales del lecho. Los valores del coeficiente de Manning oscilan entre 2 a 10 veces los obtenidos para el caso anterior. El coeficiente de Manning debe obtenerse por aplicación de la fórmula midiendo en campo los demás parámetros.

Caso III: la profundidad es menor que tres veces el d_{50} con caudales bajos y mayor que 3 veces d_{50} con aguas altas. En este caso, la mejor aproximación se hace tomando los datos de campo con dos o más juegos de caudales, lo que permitirá incluso obtener una ley de variación del rugosidad.

Leopold (1994) desarrolló una fórmula empírica para el cálculo del factor de rugosidad f en función del d_{84} (diámetro por debajo del cual se encuentran el 84% de las partículas) y de la profundidad media (h).

$$\frac{1}{f} = 1 + 2 * \log\left(\frac{h}{d_{84}}\right) \quad (3.20)$$

Bove y Milhous (1978) proponen una fórmula para obtener la rugosidad en función de la granulometría, aplicable en cauces rectos y limpios, caudales altos, no es aplicable para caudales muy bajo:

$$\eta = 0,031 * d_{75}^{1/6} \quad (3.21)$$

Siendo d_{75} el diámetro correspondiente al 75% de las partículas del lecho.

La fórmula de Jarret (1984), obtiene el valor de la rugosidad en función del radio hidráulico R y de la pendiente de la superficie del agua (I). De esta manera, no sería necesario realizar mediciones de velocidad o del caudal que atraviesa la sección:

$$\eta = 0,39 * I^{0,38} * R^{-0,16} \quad (3.22)$$

Comprobando los valores obtenidos por aplicación de esta fórmula con los obtenidos midiendo todos los parámetros necesarios en el río, se obtiene errores que oscilan entre -24 y un +32% (Grant, Duval, Koerper, y Fogg, 1992).

La fórmula más objetiva de obtener el coeficiente de rugosidad es medir en el cauce todas aquellas variables de la fórmula de Manning de esta forma obtenemos un coeficiente de rugosidad que corresponde a las características del flujo en el momento de la medición.

En la siguiente tabla se presentan los valores de la rugosidad de Chow (1994).

TABLA 3.3
VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN CAUCES NATURALES

| <i>Cauces de llanura y de menos de 30 m de anchura media</i> | | | |
|--|--------|--------|--------|
| CAUCE | Mínimo | Normal | Máximo |
| 1.- Limpio, recto, a máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos | 0,025 | 0,030 | 0,033 |
| 2.- Igual al anterior pero con más piedras y malezas | 0,030 | 0,035 | 0,040 |
| 3.- Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena | 0,033 | 0,040 | 0,045 |
| 4.- Igual al anterior pero con algunos matorrales y piedras | 0,035 | 0,045 | 0,050 |
| 5.- Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones menos eficaces | 0,040 | 0,048 | 0,055 |
| 6.- Igual al 4.-, pero con más piedras | 0,045 | 0,050 | 0,060 |
| 7.- Tramos lentos con malezas y pozos profundos | 0,050 | 0,070 | 0,080 |
| 8.- Tramos con mucha maleza, pozos profundos o en crecida con muchos árboles y matorrales bajos | 0,075 | 0,100 | 0,150 |
| <i>Cauces de montaña de menos de 30 m de anchura media, sin vegetación acuática, orillas empinadas y con matorral y arbolado en las márgenes, que se sumergen en crecida</i> | | | |
| CAUCE | Mínimo | Normal | Máximo |
| 1.- Fondo de gravas, bloques y algunas rocas | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| 2.- Fondo de bloques y bolos | 0,040 | 0,050 | 0,070 |
| <i>Llanuras de inundación</i> | | | |
| | Mínimo | Normal | Máximo |
| 1.- Pastizal sin matorral, pasto corto | 0,025 | 0,030 | 0,035 |
| 2.- Pastizal sin matorral, pasto alto | 0,030 | 0,050 | 0,070 |
| 3.- Tierras de labor sin cultivo | 0,020 | 0,030 | 0,035 |
| 4.- Cultivos en línea maduros | 0,025 | 0,035 | 0,045 |
| 5.- Campos de labor maduros | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| 6.- Matorral disperso y maleza | 0,035 | 0,050 | 0,070 |
| 7.- Pocos matorrales y árboles en invierno | 0,035 | 0,050 | 0,060 |
| 8.- Pocos matorrales y árboles en verano | 0,040 | 0,060 | 0,080 |
| 9.- Matorrales medios a densos en invierno | 0,045 | 0,070 | 0,110 |
| 10.- Matorrales medios a densos en verano | 0,070 | 0,100 | 0,160 |
| 11.- Arbolado. Sauces densos, rectos y en verano | 0,110 | 0,150 | 0,200 |
| 12.- Terreno limpio con troncos y sin retoños | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| 13.- Igual que el anterior pero con gran cantidad de retoños | 0,050 | 0,060 | 0,080 |
| 14.- Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales y el nivel del agua por encima de las ramas | 0,080 | 0,100 | 0,120 |
| 15.- Igual que el anterior pero en crecida, con las ramas dentro del agua | 0,100 | 0,120 | 0,160 |
| <i>Cauces de mas de 30 m de anchura (*)</i> | | | |
| | Mínimo | Normal | Máximo |
| 1.- Sección regular, sin bloques ni matorrales | 0,025 | - | 0,060 |
| 2.- Sección irregular y rugosa | 0,035 | - | 0,100 |

(*) El valor de η es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar debido a que los márgenes ofrecen una resistencia menor efectiva.

FUENTE: Chow, 1994 (cit. Por Mayo 2000, p. 91)

En la tabla 3.4 se proponen los valores de la rugosidad con carácter general para distintos tipos de cauce.

TABLA 3.4
VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD

| <i>Condiciones del cauce</i> | η |
|---|-------------|
| Cauces naturales de tierra, sin vegetación y sensiblemente rectos. | 0,016-0,017 |
| Cauces naturales de tierra, sin vegetación, pequeña curvatura. | 0,020 |
| Canales de tierra medianos, bien construidos y bien mantenidos. | 0,0225 |
| Pequeños canales de tierra en buenas condiciones, o grandes canales de tierra con alguna vegetación en los bancos y gravas dispersas en el lecho. | 0,025 |
| Canales con mucha vegetación en los bancos. Cauces naturales bien alineados y con la sección más o menos constante. Grandes canales de avenida bien mantenidos. | 0,030 |
| Canales de tierra cubiertos de vegetación pequeña. Canales de avenida más o menos limpios pero sin mantenimiento. | 0,035 |
| Cauces de montaña con gravas. Ríos con secciones variables y alguna vegetación en los bancos. Canales de tierra con vegetación subacuática. | 0,040-0,050 |
| Cauces menos alineados y con pocas obstrucciones (troncos, etc.) y variaciones de la sección. Poca vegetación en riberas y subacuática. | 0,060-0,075 |
| Cauces más o menos sinuosos con algunas obstrucciones y variaciones de la sección o bien, cauces más alineados pero con obstrucciones y variaciones de sección más importantes. | 0,100 |
| Cauces irregulares en planta y sección, con vegetación en las orillas y en el lecho, densa en algunos puntos o con obstrucciones por troncos. | 0,125 |
| Cauces muy irregulares, con grandes variaciones de sección, raíces, troncos o rugosidad debida al sustrato. | 0,150-0,200 |

FUENTE: Milhous, 1989 (cit. Por Mayo 2000, p. 92)

La rugosidad obtenida para la sección puede modificarse en función de la granulometría de las orillas o de la presencia de vegetación. Es necesario considerar dentro de la simulación hidráulica los coeficientes de rugosidad tanto para el lecho como para los bancos laterales pues cuando el nivel de las aguas suba, se está considerando la presencia de obstáculos para el escurrimiento. Estas variaciones y su magnitud se pueden ver en la siguiente tabla.

TABLA 3.5
AUMENTO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD CONSIDERANDO LAS
IRREGULARIDADES DEL CAUCE

| Incremento del coeficiente de rugosidad | |
|--|---------------------|
| Tipo de cauce | |
| Cauces parejos | 0,000 |
| Cauces poco irregulares | 0,001-0,005 |
| Cauces con variación moderada | 0,006-0,010 |
| Cauces muy irregulares | 0,011-0,020 |
| <i>Aumento del coeficiente de rugosidad considerando el cambio de dimensiones y de forma de la sección transversal (2).</i> | |
| Incremento del coeficiente de rugosidad | |
| Cambios en la sección | |
| Graduales | 0,000 |
| Ocasionales | 0,001-0,005 |
| Frecuentes | 0,010-0,015 |
| <i>Aumento del coeficiente de rugosidad considerando la presencia de arrastres, depósitos, troncos caídos, raíces expuestas, acúmulos de leñas, etc. (3).</i> | |
| Incremento del coeficiente de rugosidad | |
| De efecto inapreciable | 0,000-0,004 |
| De muy poco efecto | 0,005-0,015 |
| De efecto apreciable | 0,020-0,030 |
| De mucho efecto | 0,040-0,050 |
| <i>Aumento del coeficiente de rugosidad para tener en cuenta la vegetación (4). L longitud del tramo recto, L_m longitud de los meandros).</i> | |
| Incremento del coeficiente de rugosidad | |
| Tipo de vegetación | |
| Vegetación herbácea baja | 0,002-0,010 |
| Vegetación herbácea alta | 0,010-0,025 |
| Vegetación arbustiva o enmarañada | 0,025-0,050 |
| Vegetación muy desarrollada y tupida | 0,050-0,100 |
| Variación del coeficiente de rugosidad | |
| Relación L_m/L | |
| 1,0 a 1,2 | 0,000 |
| 1,2 a 1,5 | $0,15 \cdot \eta_c$ |
| >1,5 | $0,30 \cdot \eta_c$ |

Siendo η_c el valor de la rugosidad obtenida por la fórmula de Manning e incrementada por los conceptos (1) a (4).

FUENTE: Chow, 1994 (cit. Por Mayo 2000, p. 93).

3.2.3 EVALUACIÓN DEL HÁBITAT FLUVIAL

Para la evaluación del hábitat se debe tener en cuenta las características generales de la cuenca en las inmediaciones del tramo en estudio; una vez seleccionado el tramo se estudia la morfología y las características de la corriente para terminar analizando el sustrato y los diferentes elementos de cobertura a nivel de sección transversal. Las características del hábitat fluvial son de suma importancia, ya que van a condicionar la presencia de una u otra especie dadas las condiciones de pH, oxígeno disuelto y nutrientes, ciertos elementos físicos son particularmente importantes, condicionando la presencia y abundancia de especies piscícolas en un determinado tramo (Simons, Lyons, y Kanehl, 1993; p. 36).

Dentro de las metodologías hidrobiológicas el análisis del hábitat fluvial, se aborda a distintos niveles y con diferentes grados de detalle. Se lleva a cabo a varios niveles: tramo, subtramo, transecto y celda; utilizando diversos indicadores para llegar a un valor de conjunto de habitabilidad. El objetivo buscado con la evaluación del hábitat fluvial, es calcular (cualitativa y cuantitativamente) la disponibilidad de refugio de la forma más objetiva posible (Simons et al., p. 36). Además con este tipo de análisis también se puede llegar a conocer el estado de eutrofización o contaminación de un cuerpo de agua, su potabilidad para el consumo humano y animal y su grado de aceptabilidad para irrigación, para usos industriales y demás actividades relacionadas con el cuerpo hídrico.

3.2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DE RECEPCIÓN

El tramo afectado por la modificación de caudales, se estudia en su totalidad, describiendo las características de la cuenca de recepción. Los suelos tienen influencia directa en el fenómeno de escorrentía. Por lo que es importante definir su clasificación y uso. Lo que se pretende con este análisis es proveer de una visión general acerca del suelo de la cuenca, es decir el tipo de suelo, uso y granulometría.

La información acerca del tipo de suelo y uso está disponible en la cartografía temática del Ministerio de Agricultura y en el Ministerio del Medio Ambiente MAE, entre otras instituciones públicas que disponen de estos datos. Para este trabajo las inspecciones de campo y fotografías aéreas resultan de mucha utilidad, actualmente mediante el Google Earth, software de libre acceso a través del internet, se puede analizar la naturaleza de la superficie dentro del área de drenaje.

3.2.3.1.1 GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELOS

Para sistematizar las características de los suelos después de la recopilación de la información general de las unidades de suelos distribuidas en las cuencas o zona de estudio, la textura de los suelos debe ser verificada en base a los mapas originales de suelos, definiendo con mayor precisión este parámetro que se relaciona estrechamente con la tasa de infiltración (Chow, 1987, cit. en Almeida, 2010, p. 68).

El Grupo Hidrológico de Suelo (GHS) es uno de los parámetros requeridos para la determinación de la escorrentía, mediante el método propuesto en el Engineering Field Manual del Soil Conservation Service (SCS) del departamento de Agricultura de los Estados Unidos(USDA), 1971, capítulo 2, Estimación de la Escorrentía (Estimating Run off).

El potencial de escorrentía de los GHS está en función de la distribución espacial en las sub-cuencas hidrográficas como unidades de análisis de factores como la textura, de la tasa de infiltración de los suelos, de la profundidad efectiva, del drenaje de los suelos y del movimiento de agua en el suelo. Así:

$$PE = f(I, T, S, D, Nf, M) \quad (3.23)$$

En donde:

PE = potencial de escurrimiento

T = textura del suelo

I = infiltración del agua en el suelo

Pe = profundidad efectiva del suelo

D = drenaje del suelo

Nf = presencia de napa freática

M = movimiento del agua en el suelo.

En una primera aproximación el GHS se asigna al suelo un código alfanumérico, según los rangos característicos de los grupos hidrológicos de suelo que se presentan en la tabla 3.6.

Siendo el procedimiento propuesto del SCS un sistema de menos a más, así a las características de los suelos del Grupo A les corresponde el más bajo potencial de escurrimiento y al grupo D el alto potencia de escurrimiento. Así por ejemplo: si (condicional) un suelo es clasificado como del grupo A por sus características de textura – infiltración, pero si el mismo es un suelo superficial de tipo C, el potencial de escurrimiento está dado por el último. Finalmente, el GHS ponderado de las sub-cuencas o zonas de estudio se define sobre la base de la tasa de infiltración de los suelos en estos lugares (Almeida, 2010, p. 69).

TABLA 3.6
RANGOS CARACTERÍSTICOS DE LOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DE
SUELOS

| GRUPO | CLASE TEXTURAL | TASA DE INFILTRACIÓN (mm/hora) | PROF. EFECTIVA DEL SUELO cm / Denominación | DRENAJE DE LOS SUELOS | MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO | |
|----------|------------------------|--------------------------------|--|-----------------------|---------------------------------|------------|
| A | Arenoso | 12 | 160 | Muy profundos | Muy Exc. drenados | Muy rápido |
| | Areno franco | 11 | 145 | | Excesivamente drenados | |
| | Franco arenoso | 10 | 130 | | Algo exc. drenados | Rápido |
| B | Franco | 9 | 115 | Profundos | Moderadamente profundos | Moderado |
| | Franco limoso | 8 | 100 | Bien drenados | | |
| | Limoso | 7 | 85 | | | |
| C | Franco arcillo arenoso | 6 | 70 | Superficiales | Mod. bien drenados | Optimo |
| | Franco arcilloso | 5 | 55 | | | |
| | Franco arcillo limoso | 4 | 40 | | Imperfectamente drenados | Lento |
| D | Arcillo arenoso | 3 | 25 | Muy superficiales | Escasamente drenados | Muy lento |
| | Arcillo limoso | 2 | 10 | Ext. superficiales | | |
| | Arcilloso | 1 | 0 | | | |

FUENTE: Enginering Field Manual 1982 (cit. por Almeida 2010, p. 70)

Descripción de las características de los grupos hidrológicos de los suelos (SUC, 1982, cit. por Almeida 2010, pp. 70-71).

Grupo A: suelos con bajo potencial de escorrentía

Comprenden los suelos de texturas arenosas a franco arenosas: Son suelos profundos: poseen tasas de infiltración cuando están muy húmedos de 10 a 12 mm/hora, muy rápida. El drenaje natural de los suelos varía de muy excesivamente drenados a excesivamente drenados o algo excesivamente drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de muy rápida a rápida.

Grupo B: suelos con moderado potencial de escorrentía

Comprenden suelos de textura: franco, franco arenoso a limosos. Son suelos moderadamente profundos a profundos. Posee una infiltración cuando están muy húmedos de 7 a 9 mm/hora, rápida. El drenaje natural de estos suelos puede variar de algo excesivamente drenado a moderado o bien drenado. La movilidad del agua en el suelo varía de rápido a moderadamente rápida u óptima.

Grupo C: suelos con moderadamente alto potencial de escorrentía

Comprenden suelos de texturas: franco arcillo arenosos, franco arcillosos y franco arcillo limosos. Son suelos superficiales a moderadamente profundos. Poseen una infiltración cuando están húmedos de 4 a 6 mm/hora, moderada. El drenaje natural de estos suelos pueden variar de bien drenados a moderadamente bien drenados e imperfectamente drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de óptima a moderadamente lenta o lenta.

Grupo D: suelos con alto potencial de escorrentía

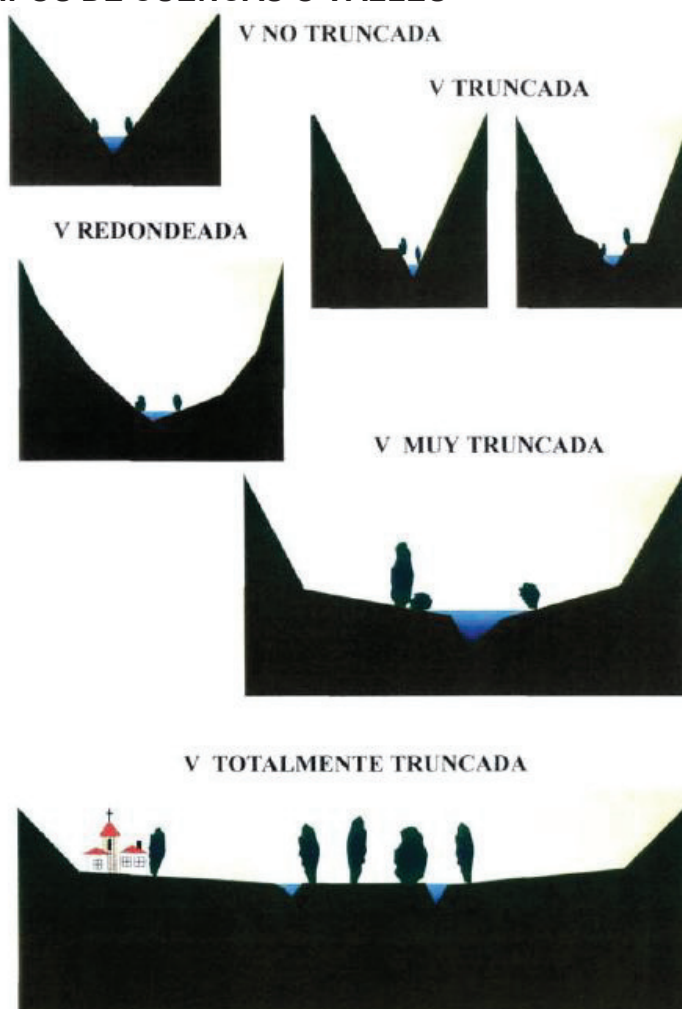
Comprende suelos de texturas: arcillo arenosos, arcillo limoso y arcillo. Son suelos extremadamente superficiales a superficiales. Posee una infiltración cuando están muy húmedos de 4 a 6 mm/hora, rápida. El drenaje natural de estos suelos pueden variar de bien drenados, moderadamente bien drenados a bien drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de lenta a muy lenta.

3.2.3.2 TIPO DE CUENCA Y RECUBRIMIENTO

3.2.3.2.1 Tipo de cuenca o valle

Según sea la forma de la sección del valle en el tramo o incluso en el subtramo. En función de la pendiente de las laderas y su proximidad al cauce, tendremos valles en forma de V no truncada, V truncada, V redondeada (valles glaciares con sección en forma de U), V muy truncada y V totalmente truncada, según puede verse en la figura 3.11. La forma del valle, junto con su orientación, condicionará el grado de insolación y de forma indirecta da una idea de los posibles usos de suelo.

FIGURA 3.11
TIPOS DE CUENCAS O VALLES



FUENTE: (Mayo, 2000, p. 118).

3.2.3.2.2 Uso de suelo

Tiene en cuenta el recubrimiento vegetal de la cueca y tipo de uso que se le da distinguiendo entre los que se detallan en la tabla 3.7.

TABLA 3.7
SUPERFICIES POR CATEGORIAS DE USO DE SUELO NACIONAL

| USO DE SUELO | % Uso Nacional |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Cultivos permanentes | 11,62% |
| Cultivos Transitorios y barbechos | 8,58% |
| Descanso | 1,07% |
| Pastos cultivados | 29,85% |
| Patos naturales | 11,96% |
| Páramo | 5,11% |
| Montes y bosque | 30,10% |
| Otros usos | 1.73% |

FUENTE: INEC ESPAC 2012

3.2.3.3 FORMA DEL TRAMO Y CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE

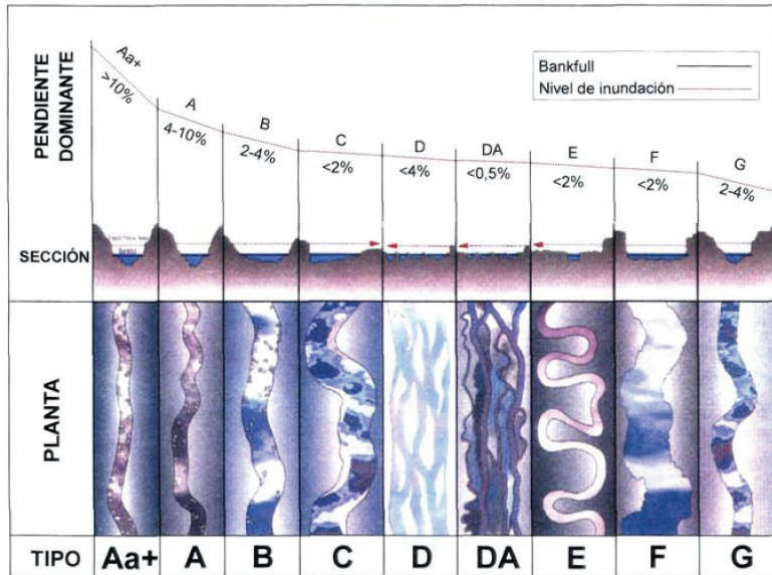
Se debe considerar la forma del cauce en planta atendiendo a la sinuosidad del su eje; distinguiendo entre tramos rectos, curvos, sinuosos, meandriformes. Rosgen (1996) propone la clasificación de los cauces atendiendo al gradiente longitudinal, la forma de la sección y la sinuosidad del cauce. La clasificación la hace a nivel paisajístico, considerando siete grandes tipos de cauce: "A", cauces de cabecera; "B", cauces intermedios; "C" y "E", cauces meandriformes; "D", cauces anastomosados; "F", cauces encajonados y "G" gargantas. Los tipos principales se subdividen en otros seis subtipos según sea la naturaleza del sustrato: 1) lechos de rica; 2) lechos con bolos y bloques; 3) lechos de grava; 4) lechos de gravilla; 5) lechos arenosos y 6) lechos limosos o arcillosos. Las características de cada tipo se exponen en las tablas 3.8 y pueden observarse en las Figuras 3.12 y 3.13.

TABLA 3.8
CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE CAUCE, EN RELACIÓN A LA SINUOSIDAD, A LA FORMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL Y PENDIENTE LONGITUDINAL. (A/P) RELACIÓN ANCHURA PROFUNDIDAD.

| Descripción | A/P ratio | Pendiente longitudinal | Índice de sinuosidad | Tipo | Paisaje, Suelos, Características |
|--|--------------|------------------------|----------------------|------|---|
| Muy pendiente, encajonado, transporte de materiales, torrentes | <12 | >10 | 1,0 – 1,1 | Aa+ | Relieve muy acentuado, cauce erosivo, con roca o materiales gruesos, Cauces muy encajonados. Santos, rabiones o incluso cascadas. Pozas profundas. |
| Pendiente, encajonado, saltos rápidos. Alteraciones de zonas de erosión y de deposición. Muy estable si predomina bloques y roca | <12 | 0,04 – 0,10 | 1,0 – 1,2 | A | Relieve acentuado, cauces erosivos, con roca o material grueso. Cauces confinados con zonas de cascadas. Pozas profundas y espaciadas asociadas a las características del lecho. |
| Encajonamiento moderado, aguas rápidas con escasas pozas. Bancos y llanuras de inundaciones | >12 | 0,02 – 0,039 | >1,2 | B | Relieve moderado. Riberas formadas por coluvios o afloramiento. Encajonamiento moderado. Valles estrechos con laderas pendientes. Los rápidos predominan sobre las pozas. |
| Pendiente baja, meandros, zonas de deposición de finos, alternancias de rápidos y pozas. Cauces aluviales con amplias llanuras de inundación bien definidas. | >12 | <0,02 | >1,4 | C | Valles amplios con terrazas y llanuras de inundación, suelos aluviales. Encajonamiento mínimo, con sinuosidad moderada. Alternancia de rápidos y pozas. |
| Cauces anastomosados con barras longitudinales y transversales. Gran anchura y bancos erosionados | >40 | <0,04 | - | D | Valles amplios con conos de deyección, depósitos aluviales o glaciares. Reajuste de la anchura con abundante aportación de sedimentos. Procesos de degradación y erosión de los bancos laterales. Gran carga de sedimentos. |
| Canales múltiples (anastomosados) pero estrecho y profundos, con llanuras de inundación bien vegetadas y bancos muy estables. Zonas húmedas asociadas. | Muy variable | < 0,005 | Muy variable | DA | Valles muy amplios con suelos aluviales de elementos muy finos. Poca carga de sedimentos. Desplazamiento laterales controlados por los bancos muy estables. |
| Pendiente muy baja, amplios meandros con alternancia de rápidos y pozas y poca deposición: Relación A/P baja, cauce muy eficiente y estable | <12 | <0,02 | >1,5 | E | Valles amplios con praderas. Llanuras de inundación de material aluvial. Cauce muy sinuoso pero con bancos estables y consolidados. |
| Cauce meandriforme pero encajado, con poca pendiente, alternancia de rápidos y pozas. Relación A/P alta. | >12 | <0,02 | >1,4 | f | Encajonamiento en los materiales erosionados. Desplazamiento meandriformes inestables con erosión de los bancos. |
| Cauce encajado, formando una garganta. Pendientes suaves, alternancia de pozas y saltos. Relación A/P baja | <12 | 0,02 – 0,039 | >1,2 | G | Gargantas. Valles estrechos o profundamente excavados en depósitos coluviales o aluviales (conos de deyección o deltas). Cauces inestables con fuerte erosión de los bancos laterales. |

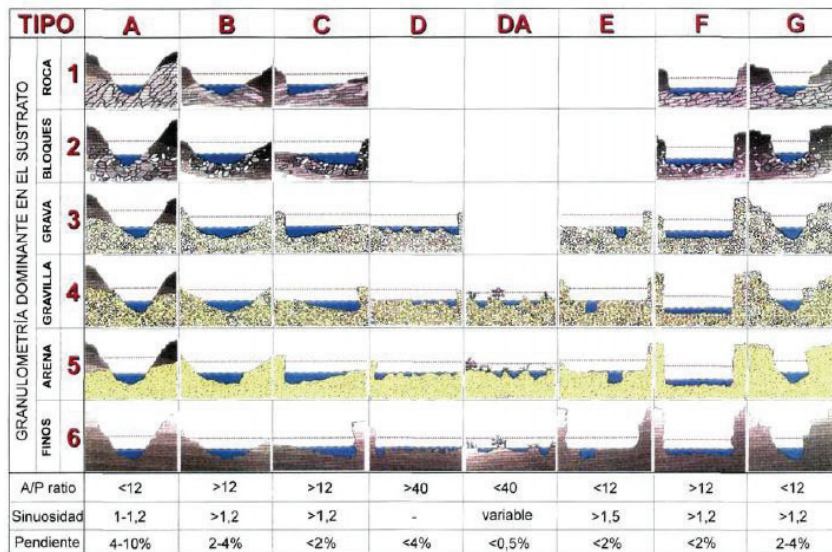
FUENTE: Rosgen 1996 (cit. por Mayo 2000, p. 120)

FIGURA 3.12
CLASIFICACIÓN DE LOS CAUCES FLUVIALES ATENDIENDO A SU
PENDIENTE LONGITUDINAL, LA SECCIÓN DEL CAUCE Y LA
SINUOSIDAD DEL TRAZADO



FUENTE: Rosgen 1996 (cit. por Mayo 2000, p. 121)

FIGURA 3.13
DISTINTAS SECCIONES TRANSVERSALES EN FUNCIÓN DE LA
NATURALEZA DEL SUSTRATO Y SU CORRESPONDENCIA CON EL
TRAZADO LONGITUDINAL



FUENTE: Rosgen 1996 (cit. por Mayo 2000, p. 122)

Para clasificar la corriente, se evalúa el tipo de flujo, considerando la presencia de saltos (especificando su altura, rabiones turbulentos, rápidos, tablas o remansos y pozas y pozos, diferenciados de la siguiente forma (Overton, Wollrab, Roberts, y Radko, 1997, cit. por Mayo 2000, p. 125).

- Saltos: caídas de agua más o menos a plomo, desde una altura variable (ángulo de la lámina con respecto a la horizontal mayor de 80°).
- Rabiones: agua turbulenta muy agitada, con pequeños saltos y frecuentes saltos hidráulicos, ocupando una cierta extensión longitudinal del cauce.
- Rápidos: aguas que circulan a gran velocidad (velocidad $> 0,3$ m/s), en flujo turbulento y con rizaduras en la superficie. La profundidad es relativamente escasa en relación a la anchura del cauce.
- Tablas o remansos: zonas del río en las que las aguas circulan con cierta velocidad, pero de forma que no se producen grandes turbulencias. La superficie es más o menos lisa y la profundidad relativamente mayor con respecto a la anchura del cauce. Generalmente el régimen es laminar.
- Pozas: zonas de poca extensión, con profundidad de 75 cm a 1,5 m en las que las aguas tienen poca velocidad, no se mueven apreciablemente o incluso hay zonas con contracorriente.
- Pozos: zonas de gran extensión y profundidad (mayor de 1,5 m) en las que se producen las mismas condiciones de velocidad que en el caso anterior.

En la tabla 3.9 se presenta la clasificación del régimen de aguas en función de la velocidad y profundidad.

TABLA 3.9
CLASIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE AGUAS EN FUNCIÓN DE LA
VELOCIDAD Y LA PROFUNDIDAD (CAUCES DE MÁS DE 5 METROS DE
ANCHURA MEDIA). SIN RIZADURAS: RÉGIMEN LAMINAR, CON
RIZADURAS RÉGIMEN TURBULENTO

| PROFUNDIDAD | VELOCIDAD | | | | | | |
|---------------|--|------------------|----------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 0 - 0,1 (m/s) | > 0,1 - 0,3 (m/s) | > 0,3 - 1,0 (m/s) | | > 0,1 (m/s) | |
| | | | | Sin rizaduras | Con rizaduras | Sin rizaduras | Con rizaduras |
| < 25 cm | Zonas someras de las orillas hábitat lateral | Tabla lenta | Tabla rápida | Tabla rápida | Rápido | Tabla rápida | Rápido |
| 25 - 75 cm | Remanso | Tabla lenta | Tabla lenta | Tabla rápida | Rápido | | Rápido |
| > 75 - 150 cm | Poza | Poza | Poza | Tabla rápida | Rápido | Tabla rápida | Rápido |
| > 150 cm | Pozo | | | | | | |

FUENTE: Overton, et al. 1997 (cit. por Mayo, p. 125)

Un indicador de la capacidad de corriente es el ratio que es la relación entre pozos y rápidos, determinado por el porcentaje de longitud de tramo ocupado por uno y otro tipo de flujo. Proporciona zonas de descanso (pozos) y zonas de producción de alimento (rápidos) para los peces (Platts, 1983, cit. por Mayo 2000, p. 132). Se comprueba también la presencia de remansos aislados en zona de más corriente, pequeñas zonas de aguas calmadas tras grandes bloques u otros obstáculos en el río, que pueden suponer zonas de descanso a los peces y que están incluidas en zonas de agua más rápidas.

3.2.3.4 HÁBITAT LATERAL

El hábitat lateral es de suma importancia para la supervivencia y desarrollo de los macro invertebrados, comprenden zonas con velocidades de agua pequeñas (menos de 4 cm/s), generalmente ubicadas en las inmediaciones de las márgenes: Los bloques, troncos caídos, raíces, etc, modifican las condiciones de las corrientes las mismas que son utilizables por los individuos jóvenes. Se crean zonas con contracorrientes protegidas del flujo principal, aunque lo normal es que con aguas más altas desaparezcan.

El hábitat lateral se compone de: márgenes de la corriente, remansos y pequeñas pozas aisladas del cauce principal (Mayo, 2000, p. 132).

- Los márgenes de la corriente son zonas de aguas someras y escasa velocidad, pero que no están aisladas del flujo principal y pueden sufrir alteraciones por las variaciones del mismo. Se caracterizan por tener velocidades de 4 cm/s y la profundidad inferior a los 20 cm (por ejemplo zonas de orillas protegidas por bloques y gravas entre los que circula el agua con lentitud).
- Los remansos son zonas de movimiento muy lento, con pendiente superficial prácticamente nula y apartados de la influencia de la corriente principal, aunque poseen conexión con ella (por ejemplo la zona protegida por un tronco caído o por vegetación emergente).
- Las pozas están aisladas de la corriente principal y sólo se ven invadidas por ella durante las crecidas; al igual que los remansos, la profundidad puede superar los 20cm.

3.2.3.4.1 Evaluación del estado de las orillas

Las características físicas de la sección, el estado de los bancos laterales es el factor que más influye en la calidad del hábitat. Las orillas cubiertas de vegetación son estables, incluso si presentan bancos o cornisas en la parte inferior proporcionan sombra y cobertura a la fauna acuática. Es evidente que

el grado de alteración o estabilidad de las orillas pueden comprometer la duración o la utilidad de estos refugios. Las oscilaciones del caudal pueden originar erosiones en la orilla según la naturaleza de los bancos laterales o su grado de protección frente a la erosión (Simons et al, 1993, cit. por Mayo 2000, p. 141).

La evaluación del grado de alteración de las orillas (erosiones, desmoronamientos, modificaciones antrópicas), se pueden evaluar en función de la longitud alterada dentro del subtramo en estudio como se muestra en la siguiente tabla (Plattser al, 1983, cit. por Mayo 2000, p. 141).

TABLA 3.10
GRADO DE ALTERACIÓN DE LAS ORILLAS

| GRADO DE ALTERACIÓN | LONGITUD ALTERADA |
|--|-------------------|
| Bancos laterales estables y no alterados, ni por el agua ni por otras causas (usos agrícolas, animales, etc.) | 0% |
| Los bancos laterales son estables pero se encuentran algo alterados en menos de un 25% de la longitud asignada al transecto. | 1 a 25% |
| Bancos moderadamente alterados, pero por lo menos un 50% de su longitud se encuentra en buenas condiciones. Menos del 50% presenta erosiones o alteraciones. | 26 a 50% |
| Bancos claramente alterados, menos de un 50% presentan un buen estado. Más del 50% de su longitud presenta alteraciones más o menos fuertes, que pueden ser naturales, artificiales o una combinación de ambas. | 21 a 75% |
| Los bancos se encuentran alterados en casi toda su longitud. Menos de un 25% se encuentra en buenas condiciones. Alteraciones de mismo tipo que el anterior. Se incluyen en este tipo también las orillas antiguamente alterada, hoy recuperadas, pero que no proporcionan refugio a la pesca ¹ | 76 a 100% |

¹ se refiere a las orillas que la vegetación a recolonización, pero sus bordes no cuelgan sobre el agua, proporcionando sombra; o bien, las cornisas y cuevas que puedan existir en su parte inferior permanecen en seco.

FUENTE: Platts 1983 (cit. por Mayo, p. 141)

En la figura 3.14 se muestran algunas características de los bancos laterales, que pueden ayudar a clasificar su estabilidad.

FIGURA 3.14
POSIBILIDAD DE EROSIÓN DE LOS BANCOS LATERALES EN FUNCIÓN
DE SU FORMA Y DE LOS MATERIALES QUE LOS CONFORMAN

| | | | | | | |
|------------------------|-------------------|---|------------------|---|---------------------------|--------------------------|
| EROSIONABILIDAD | BAJA | | | | | |
| | MODERADA | | | | | |
| | ALTA | | | | | |
| | Nivel de bankfull | $\frac{\text{Altura banco}}{\text{Profundidad bankfull}}$ | Ángulo del banco | Densidad de raíces Superficie de banco protegida %de altura de banco con raíces | Estratificación del suelo | Tamaño de las partículas |

FUENTE: Rosgen 1996 (cit. por Mayo, p. 142)

La estabilidad de las orillas pretende determinar el grado en que los bancos laterales son susceptibles a perder material, particularmente suelo, cuando son inundados por el agua, bien por precipitaciones o por el aumento del caudal circulante. Li y Shen (1973), comprobaron que la vegetación de orilla crea una rugosidad, que frena la velocidad del agua, reduciéndose la erosión del banco.

La estabilidad puede clasificarse en función de las características que se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 3.11
CLASIFICACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIDAD DE LAS ORILLAS

| GRADO DE ESTABILIDAD | CLASIFICACIÓN |
|--|---------------|
| Más del 80% de la longitud de orilla, asignada al transecto, está cubierta por vegetación vigorosa. Si no la cubre, la estabilidad está asegurada por presencia de bloques, roca madre u otros materiales difícilmente erosionables. | Excelente (4) |
| Cobertura de vegetación de un 50 a 79% o bien, materiales que se erosionan mínimamente | Buena (3) |
| Del 25 al 49% de cobertura por vegetación o bloques, zonas desnudas cubiertas por material fácilmente erosionable. | Pobre (2) |
| Menos del 24% cubierto por vegetación o bloques, las zonas desnudas con poca o nula resistencia a la erosión. Cada año se erosionan más los bancos en la época de aguas altas. | Mínima (1) |

FUENTE: Platts 1983 (cit. por Mayo, p. 143)

Platts (1976), evalúa cuantitativamente la calidad de los bancos lateral, en función de su estabilidad y de la vegetación que los recubre, asignado los valores de la siguiente tabla:

TABLA 3.12
CALIDAD DE LOS BANCOS LATERALES

| COBERTURA | CARACTERÍSTICAS | CONDICIÓN | VALORACIÓN |
|------------|-----------------------|------------|------------|
| Arbórea | Tocones, raíces, roca | Excelentes | 1,00 |
| Arbustiva | Matorral, bloques | Buena | 0,75 |
| Herbácea | Hierbas, gravas | Pobre | 0,5 |
| Muy escasa | Se desmorona | Mínima | 0,25 |
| Ninguna | Arenas y finas | Nula | 0 |

FUENTE: Platts el al 1983 (cit. por Mayo, p. 143)

3.2.3.5 SUSTRATO

El sustrato es la mezcla de partículas que componen el lecho del río se caracteriza en función del diámetro medio de las partículas que componen el lecho. La distribución y composición del sustrato son fundamentales para el equilibrio de la biocenosis Bovee (1982). Proporciona cobertura a los peces y

macro invertebrados en sus distintos estadios. El sustrato del lecho se evaluará atendiendo a su composición granulométrica, especificando también su naturaleza (silicea, caliza, volcánica u otra) e indicando el tipo de roca o mineral que predomina (cuarcita, caliza, dolomía, granito, etc.). Se califica la forma de las partículas; ya que según sean angulosas, redondeadas o aplanadas podrán ser utilizadas para la freza. Directamente relacionado con el sustrato estará la movilidad de las partículas.

3.2.3.6 CLASIFICACIÓN DIAMÉTRICA

Para efectos de la evaluación del hábitat fluvial se emplean seis categorías (Bovee 1977; Raleigh, Zuckerman y Nelson, 1984; Overton et al, 1997, cit. en Mayo 2000, p. 135) según las siguientes equivalencias:

- Finos: la misma categoría de finos de la clasificación granulométrica básica.
- Arenas: arenas y gravillas finas.
- Gravillas: gravas finas.
- Gravas: gravas medianas y gruesas.
- Roca madre: bolos y roca madre.

3.2.3.7 COBERTURA

Butler y Hawthorne (1968) concluyen que la cobertura comprende todos aquellos objetos que ocultan o dan sombra. Bovee (1982), describe a la cobertura como cualquier estructura que proporciona una reducción de la iluminación, de la velocidad o de la visibilidad o una combinación de ellos. O de forma más sencillas, cualquier cosa, tras la que o debajo de la que, el pez pueda ocultarse.

3.2.3.8 FUNCIONES DE PREFERENCIA

Las funciones de preferencia reflejan la tolerancia de una determinada especie a una serie de condiciones del hábitat, partes inherentes al cauce (cobertura, sustrato y parte originadas por el régimen de caudales (velocidad y profundidad) o visto de otro modo, la idoneidad de las condiciones que se producen para determinado caudal. Estas funciones, se basan en la suposición de que los individuos de una especie, tienden a seleccionar áreas dentro del cauce en la que se producen las combinaciones hidráulicas más favorables. No obstante, no utilizan zonas con condiciones menos favorables, pero en estos casos, la probabilidad de uso y ocupación disminuye. También se asume que los individuos huirán de las zonas en las que las condiciones sean absolutamente desfavorables (Bovee y Cochnauer, 1977; Fragnoud, 1987; Heggenes, 1990; cit. Mayo, 2000, p. 175).

Las funciones de preferencia se determinan para aquellos parámetros directamente ligados a condiciones hidráulica: velocidad, profundidad, sustrato y temperatura. La cobertura es otro factor que se puede tener en cuenta (Bovee, 1978, Slauson, 1988, Heggenes, 1990, cit. por Mayo 2000, p. 175). Se presentan en forma de curva de probabilidad de uso, cuyos picos representan la condición óptima o máxima idoneidad para un determinado parámetro.

Las curvas se desarrollan mediante cuatro técnicas de análisis: 1) análisis de frecuencias, 2) análisis de intervalos de tolerancia y valores óptimos, 3) ecología de la especie y 4) análisis indirecto de los parámetros.

El análisis de frecuencias es el método preferible, ya que, la forma de la curva puede determinarse directamente de los datos obtenidos. Estos se obtienen por mediciones directas de aquellos puntos en los que se ha observado la presencia de la especie en estudio. En caso de no disponer de estos datos de observación directa, se puede utilizar el segundo método, obteniendo los datos de la bibliografía existente en cuanto a los rangos de tolerancia y los valores óptimos dados por diferentes autores. El tercer método consiste en obtener de

la bibliografía los datos existentes sobre la utilización del hábitat por una determinada especie lo que puede traducirse en una curva de preferencia aproximada. El cuarto método consiste en simular las condiciones hidráulicas para determinar los valores tolerables (Mayo, 2000, p. 176).

Existen cuatro categorías de las funciones de preferencia, según sea la procedencia de los datos y el tratamiento que se haga a ellos:

Categoría I: incluyen las curvas más generales, en las que se han reagrupado todos los datos disponibles obtenidos en el campo, procedentes de diversas fuentes bibliográficas e incorporando los juicios de profesionales. Las preferencias de los hábitats de la especie considerada son aplicables a la totalidad de su distribución geográfica y para todo el ciclo anual.

Categoría II: para elaborar las curvas de esta categoría, solo se consideran los datos de campo recogidos para un río en específico. Se realiza un análisis de frecuencias de los datos obtenidos para cada uno de los parámetros, especie o incluso clases de edad seleccionadas. Estas curvas solo son aplicables en el lugar en que se han obtenido los datos.

Categoría III: en la construcción de este tipo de curvas, se tiene en cuenta el hábitat disponible en la zona en que se han obtenido los datos de utilización del hábitat por la especie considerada. Es decir, además de estudiar las preferencias de la especie, se mide la disponibilidad de cada uno de los parámetros considerados en el lugar que ocupan. Eliminando el efecto debido a la disponibilidad (preferencia/disponibilidad), se obtienen unas curvas utilizables en cualquier lugar.

Categoría IV: las curvas de esta categoría contemplan la interacción entre dos o más parámetros suponiendo un efecto sinérgico entre ambos; de tal forma que se pueden modificar las preferencias individuales de cada uno de los parámetros cuando se consideran en conjunto.

Las curvas de las categorías II y IV solo pueden ser utilizadas en el lugar del que proceden los datos para su elaboración, mientras no se compruebe su validez para otro lugar. Por el contrario, las curvas de las categorías I y III pueden ser utilizadas, en principio, en cualquier lugar, ya que representan las preferencias de la especie en general; en el caso de la categoría I por la amplitud de los datos utilizados y en el caso de la categoría III por haberse eliminado el factor disponibilidad inherente al lugar de procedencia de los datos (Fagnoud, 1987, p. 435).

Las funciones más utilizadas son las mono variables. Básicamente, se utilizan las funciones de preferencia respecto a la profundidad y a la velocidad entre los parámetros hidráulicos, las preferencias de cobertura (a través de la disponibilidad de refugio), y las preferencias de sustrato; evaluando la idoneidad de las condiciones de un determinado caudal (Mayo, 2000, p. 177).

3.3 RECOPIACIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

3.3.1 CRITERIOS HIDROLÓGICOS

En el país es evidente no solamente la falta de información hidrológica y meteorológica, sino también los vacíos existentes en los registros al igual que los errores en las distintas etapas del acopio de la información que se reflejan en la inexactitud e incoherencia de los valores dentro de las series de datos. Por lo que el pre-procesamiento de la información de datos es importante, existen distintos métodos que permiten detectar datos sospechosos en la serie de datos y otros que posibilitan el complementar el relleno de datos faltantes.

3.3.1.1 RELLENO DE DATOS FALTANTES

Una vez realizada la recopilación y revisión de los datos de las estaciones es posible observar gran cantidad de vacíos dentro de la misma, lo cual no permite tener una serie continua y con la extensión necesaria para la

realización del estudio. Por lo que es necesario trabajar con una estación cercana a la estación objeto de estudio. Para completar la información se utiliza el análisis de regresión lineal, que calcula el coeficiente de correlación R (Almeida, 2010, p. 168).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.24)$$

Donde,

x = variable independiente;

y = variable dependiente;

\bar{x} = promedio de los valores de x ; y .

\bar{y} = promedio de los valores de y .

El coeficiente de correlación varía entre -1 y 1. Un valor cercano a 0 indica que x y y no están correlacionados linealmente. Para fines prácticos se admite como aceptables aquellas series que presentan su coeficiente de correlación $R > 0,7$, para el período común de datos.

3.3.1.2 HOMOGENEIZACIÓN

Los datos se debieron obtener bajo las mismas condiciones de experimentación. La heterogeneidad de los datos también puede deberse a eventos especiales climáticos que se presentan en el transcurso del tiempo y se originan por factores externos como deforestación, formación de pantanos o la acentuada variabilidad climática global (Ríos, 2010, cit. por Almeida, 2010, p. 171). Los procedimientos más comunes para el estudio de la homogeneidad son las pruebas de rachas y la curva de doble masa.

3.2.1.3 PRUEBA DE RACHAS

Consiste en establecer la distribución de los elementos en relación con el valor de la mediana por sobre o debajo de esta:

- Calcular la mediana de la serie de datos, anuales o mensuales (N);
- Conteo del número de cambios hacia arriba (+) o hacia abajo (-) de la mediana;
- Conteo de número de rachas (NS). Siendo una racha cada cambio de signo que se produzca en el conteo referido en el literal anterior.

NA es el número de valores por encima de la mediana y NB los valores por debajo de la mediana. Si la serie es homogénea entonces $NA = NB$ y le corresponden un número determinados de rachas con una probabilidad entre el 10% y 90% (Ver Tabla 3.13) (Almeida, 2010, p. 172).

TABLA 3.13
DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE RACHAS SEGÚN THOM.
RECOMENDADO POR LA OMM

| NA | P 10% | P 90% |
|----|-------|-------|
| 10 | 8 | 13 |
| 11 | 9 | 14 |
| 12 | 9 | 16 |
| 13 | 10 | 17 |
| 14 | 11 | 18 |
| 15 | 12 | 19 |
| 16 | 13 | 20 |
| 17 | 14 | 21 |
| 18 | 15 | 22 |
| 19 | 16 | 23 |
| 20 | 16 | 25 |
| 25 | 22 | 30 |
| 30 | 26 | 36 |
| 35 | 31 | 41 |
| 40 | 35 | 47 |
| 45 | 40 | 52 |
| 50 | 45 | 57 |

FUENTE: Castillo y Sentis 2001(cit. por Almeida 2010, p. 172)

3.3.1.4 CURVA DE DOBLE MASA

Es un método que permite demostrar de manera gráfica la relación que existe entre las variables climáticas de estaciones circundantes entre sí, para períodos comunes de información. Se traza un gráfico sobre uno de los ejes coordenados de los valores acumulativos de dos series hidrohómeas, las mismas que deberían formar una línea recta, pues serían proporcionales entre sí. Si se presenta un cambio de pendiente, tal vez se debe a causas diferentes a las meteorológicas. En las abscisas se ubican los valores acumulados de la serie base (como datos más fiables, registro extenso) y en las ordenadas los de la estación en problemas (Montealegre, 2010, p.34).

Los cambios de la pendiente que llegan a -5 puntos, no son representativos de un error sistemático. Sin embargo si el cambio de pendiente es muy acusado puede aceptarse la representatividad con un número mínimo de tres puntos (Gobierno de Cantabria, 2005, p.22). Si la naturaleza de error es sistemática, su rectificación requiere determinar el tramo correcto, el factor de corrección se puede deducir a partir de la siguiente fórmula (Oñate, 2010, p. 34).

$$P_{cr} = \frac{t_{cr}}{t_{ir}} * P_{ir} \quad (3.25)$$

Donde,

P_{cr} = valor parcial corregido;

P_{ir} = valor parcial incorrecto;

t_{cr} = pendiente del tramo correcto; y,

t_{ir} = pendiente del tramo incorrecto.

3.3.2 CRITERIOS HIDRÁULICOS

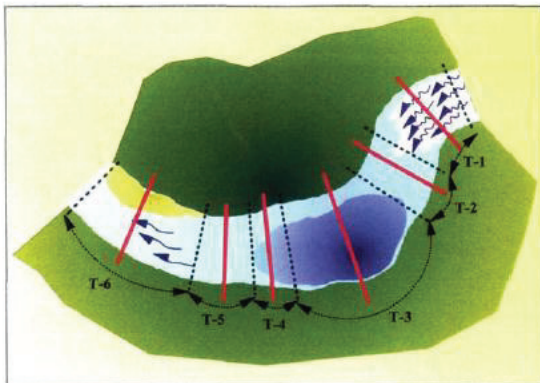
En esta sección se describen los procedimientos a seguir para la obtención de los datos que definen la forma de la sección, su parte mojada o cauce propiamente dicho y las velocidades.

3.3.2.1 UBICACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Para la ubicación de la sección transversal se realiza el recorrido del cauce en estudio y se realizan las divisiones en los tramos que se juzgan convenientes y en los cuales se localizan las secciones transversales representativas.

El objetivo es marcar estas secciones sobre el terreno con estaca o cuerdas que atraviesan el cauce de una orilla a la otra teniendo como característica principal que debe ser perpendicular al flujo. Es también conveniente, señalar el comienzo y el final de la longitud del cauce que es representada por cada una de las secciones transversales (Ver Figura 3.15).

FIGURA 3.15
SECCIONES TRANSVERSALES EN UN TRAMO



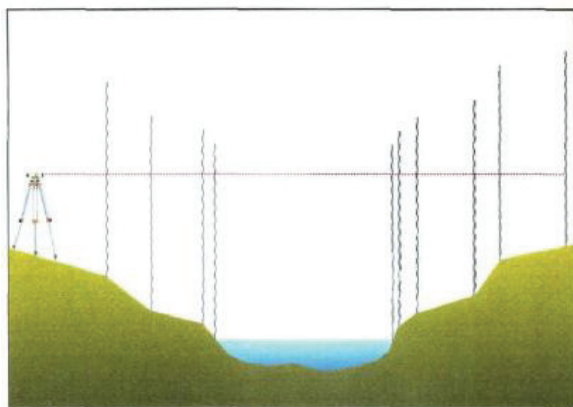
FUENTE: (Mayo, 2000, p. 73)

3.3.2.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

El levantamiento topográfico se lleva a cabo en cada sección transversal, con el fin de definir el perfil transversal, se debe tomar en especial cuidado con el levantamiento de las orillas y las zonas del cauce que puedan aparecer en

seco. Nos permite definir el nivel bank full, por lo que es conveniente extenderse suficientemente por las riberas en la toma de datos. Con ayuda de equipo topográfico se levantan aquellos puntos donde se produzcan cambios de pendiente significativos hasta cubrir toda la sección transversal (Ver Figura 3.16). El trabajo consiste en dos actividades diferenciadas: el levantamiento de las márgenes es decir las zonas que aparecen en seco y el levantamiento del lecho y bancos laterales ocupados por la lámina de agua.

FIGURA 3.16
LEVANTAMIENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL



FUENTE: (Mayo, 2000, p. 73)

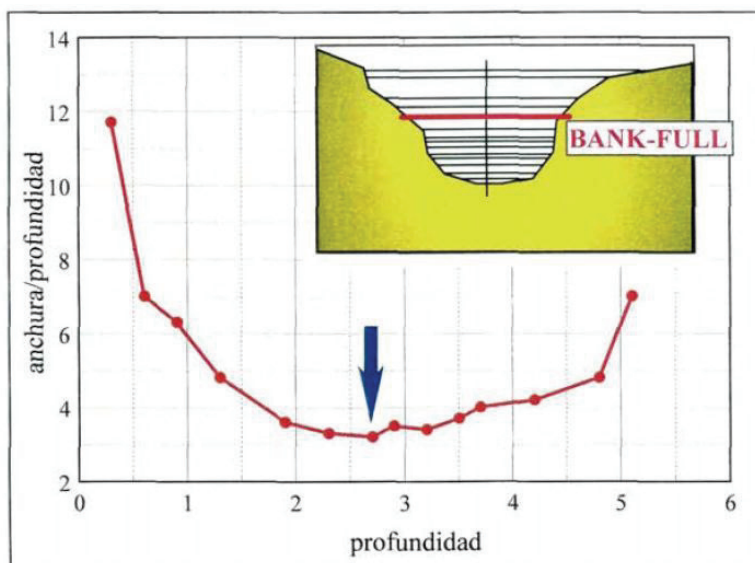
3.3.2.3 ANCHO DEL CAUCE

Al efectuar el levantamiento de la sección transversal obtenemos el ancho del cauce. Se entiende por ancho del cauce a la distancia horizontal medida en una sección transversal (perpendicular al flujo) de orilla a orilla y por la superficie del agua. No se debe excluir de la medición los pequeños salientes sobre la superficie del agua (troncos, suelo, etc.), de escasas dimensiones (más de 50 cm de ancho) además de las zonas periféricas que pueden aparecer encharcadas. Es conveniente, realizar varias mediciones de la anchura con el fin de obtener un promedio (Simonsson et al, 1983; 1994, cit. por Mayo, 2000, p. 77). Ver Figura 3.17.

De acuerdo con Leopold (1994) y Harrelson, Rawlins, y Potyondy (1994) existen algunas características para determinar el bank full, observando cambios significativos que se producen en las orillas.

- Puede venir marcado por un cambio en la vegetación por ejemplo un cambio brusco desde sedimentos desnudos a una zona cubierta por vegetación.
- Cambio brusco de pendiente. Es frecuente que la pendiente lateral de los bancos sea mayor que la llanura de inundación.
- Cambio en la composición de los materiales de la superficie del terreno, por ejemplo de gravilla a grava mas gruesas, de arenas a gravillas.
- Se observa la deposición de diversos materiales, que han sido arrastrados por el agua durante una crecida.
- Las rocas pueden mostrar marcas del nivel de las crecidas, incluso existieran variaciones en la composición de los líquenes que las cubren.

FIGURA 3.17
ANCHO CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE SECCIÓN PLENA O BANK-FULL



FUENTE: (Mayo, 2000, p. 79)

3.3.2.4 VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD DEL CAUCE

Para medir la velocidad en el cauce es necesario una cinta, una regleta y un molinete. El muestreador es la persona que atraviesa la sección parando a intervalos prefijados o variables según la corriente y la forma del lecho. Los intervalos dependen del ancho del río lo suficientemente próximos para no perder precisión y tampoco que la recogida de los datos resulte onerosa. Una buena separación entre puntos es la que resulta de fijar una anchura de celdas igual al 10% de la anchura total de la sección.

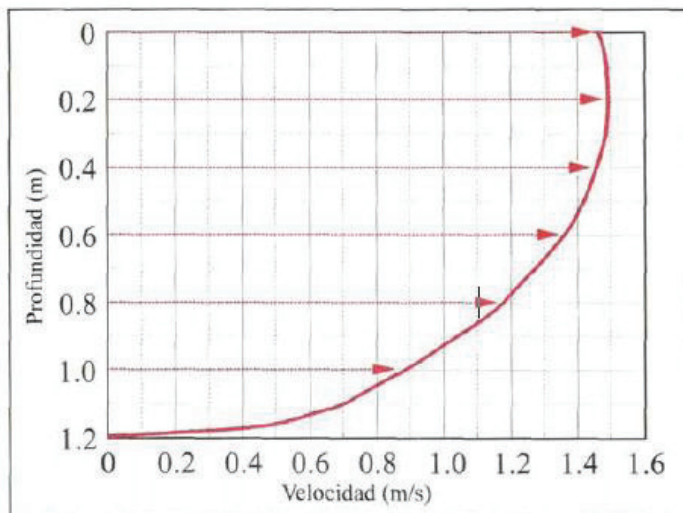
Si el ancho del río es muy pequeño, se reducirá la sección en intervalos tal como sea necesario. Según Newbury y Gaboury (1993) los intervalos deberían oscilar entre 0.3 y 3 metros de ancho, según el ancho del cauce en cuestión. Harrelson et al (1994) recomienda efectuar al menos 25 intervalos, sin olvidar que un número excesivo de intervalos no redundan en una mayor exactitud.

Una vez seleccionadas las verticales que separan cada celda, se procede en cada punto a la medición de la profundidad y la velocidad media. La profundidad es la distancia existente entre la superficie del agua y la superficie del lecho en el punto muestreado. La profundidad se la mide utilizando una regleta graduada en centímetros y se apoya suavemente en el fondo, de manera que altere lo menos posibles su composición para evitar variaciones en la profundidad.

En la misma vertical que se tomó la profundidad se mide la velocidad, utilizando un molinete introducido a la profundidad necesaria en función del tipo de flujo, con el fin de obtener una medición precisa de la velocidad media en esa vertical. Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción sobre el lecho y los bancos laterales, la velocidad no es uniforme en toda la sección. En condiciones ideales la velocidad es máxima en la superficie del agua y va decreciendo hacia el fondo en forma logarítmica (Ver Figura 3.18), de forma similar, va decreciendo hacia las orillas (Leopold, 1994, cit. por Mayo 2000, p. 102). Generalmente, la velocidad es máxima algo por debajo de la superficie

(entre 0,05 y 0,25 veces la profundidad) y contrariamente a lo que puede suponerse, el viento en la superficie tiene muy poco efecto en la distribución de la velocidades (Chow, 1994).

FIGURA 3.18
DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD



FUENTE: (Mayo, 2000, p. 103)

De acuerdo con la distribución de velocidades es necesario realizar las mediciones puntuales con el molinete a distintas profundidades según los siguientes casos:

- Si la profundidad es menos de 20 cm, es suficiente con tomar una medición a 0,5 veces la profundidad total.
- Si el escurrimiento es laminar y la profundidad está comprendida entre 20 y 45 cm, puede bastar con una sola toma, situando el molinete a una distancia igual a 0,6 veces la profundidad total. Esto proporciona la velocidad media en esa vertical (Bovee y Milhous, 1978; Chow, 1994; Leopold, 1994).
- Si la profundidad está comprendida entre 45 y 75 cm, se tomarán dos mediciones a 0,2 y otra a 0,8 veces la profundidad total, medida desde la

superficie (Bovee y Milhous, 1978). La velocidad media (V_m) en la vertical, es la media aritmética de esas dos velocidades.

$$V_m = \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2} \quad (3.26)$$

- Si la profundidad es mayor de 75 cm, se hacen tres mediciones de la velocidad, a 0,2; 0,6 y a 0,8 de la profundidad total, medida desde la superficie. La velocidad media de esa vertical es la siguiente:

$$V_m = \frac{V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8}}{4} \quad (3.27)$$

- En caso de profundidades mayores a 1,5 m, se medirán las velocidades a distintas profundidades, según sea conveniente (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y 0,9 veces la profundidad). La velocidad media de la vertical está dada por:

$$V_m = \frac{V_{0,2} + V_{0,4} + V_{0,6} + V_{0,8} + V_{0,9}}{5} \quad (3.28)$$

- Si el flujo es muy irregular, se deben hacer varias mediciones a incrementos de 1/10 de la profundidad (Newbury y Gaboury, 1993, cit. por Mayo, 2000, p. 104).

El molinete se orientará en dirección del flujo. A mayor tiempo de medida, se consigue mayor aproximación de la velocidad media del punto, ya que se promediarán las variaciones que se producen en el flujo. Tiempos muy largos puede producir cansancio del muestreador, que a veces se encuentra en equilibrio inestable. Es preferible repetir medidas de menos duración (15 a 20 segundos en un tiempo aceptable). El tiempo de medición en la mayoría de los casos viene preestablecido por el fabricante de aparato, siendo necesario, en algunos casos varios ciclos de medida.

3.3.3 CRITERIOS BIOLÓGICOS

Los ecosistemas acuáticos continentales han sufrido más los impactos causados por la actividad humana en las últimas décadas. El uso de macro invertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua tiene cada vez más aceptación entre los ecólogos y es uno de los métodos más usados en la evaluación de los impactos ambientales, así como también para definir un régimen de caudales en el río. Con el estudio de la biología se puede conocer el estado de eutrofización o contaminación de un cuerpo de agua, su potabilidad para el consumo humano y animal y el grado de aceptabilidad para irrigación, para usos industriales, para piscicultura y demás actividades humanas (Roldán, 1996, p.1).

Las características del hábitat fluvial son de suma importancia, ya que van a condicionar la presencia de unas u otras especies (Simonson et al, 1993). Dadas las condiciones favorables de pH, oxígeno disuelto y nutriente, ciertos elementos físicos del hábitat son particularmente importantes, condicionando la presencia y abundancia de especies dentro de un determinado tramo del cauce (Ryder y Kerr, 1989).

El análisis del hábitat fluvial, se aborda a distintos niveles y con diferencia en los grados de detalle. Este se lleva a cabo en: tramo, subtramo, sección y celda; se utilizan diversos indicadores para llegar a un valor de conjunto de habitabilidad. El objetivo que buscan estas metodologías es calcular (cuantitativa y cualitativamente) la disponibilidad de refugio lo que determinará la habitabilidad de la zona (Mayo, 2010, p. 116).

3.3.3.1 TRABAJO DE CAMPO

Para el trabajo de campo es importante que el muestreo biológico se lo realice de forma independiente al levantamiento de las secciones transversales para reducir el impacto del ingreso al río durante las mediciones de los niveles, por la deformación del lecho. La colección de las muestras biológicas debe

realizarse antes del registro de las variables hidráulicas para evitar que la perturbación del medio ahuyente a las especies.

3.3.3.1.1 Métodos de recolección

Los métodos de recolección de la fauna béntica varían de acuerdo al sustrato (arena, piedras, fango, vegetación o al tipo de investigación que se quiere realizar.

De acuerdo con el tipo de sustrato estos se dividen en tres categorías (Roldán, 1996, pp.3-4):

- Agua corrientes poco profundas

Este tipo de sustratos son productivos, la mejor técnica para atrapar la fauna béntica es la red de mano (artefacto sencillo y eficiente) que permite obtener una fauna variada y abundante. Un procedimiento cualitativo se desarrolla con dos personas, una toma la red por los mangos fijándola al sustrato en contra de la corriente y la otra persona, remueve el fondo con los pies agua arriba; las larvas presentes son arrastradas por la corriente y atrapadas en la red.

El sustrato artificial se utiliza tres dispositivos, consiste en colocar piedras dentro de una canasta de alambre (50 cm de longitud por 20 cm de diámetro); esta se llena de rocas y se fija en el fondo de la corriente. Se espera que al cabo de unas cuatro semanas el sustrato haya sido colonizado por los organismos acuáticos.

Para obtener muestras cuantitativas en función del área de barrido se puede utilizar una red Surber (consta de un marco metálico de 900 cm² sujeta por una red nylon de 500 μm), se coloca en el fondo de la corriente y con las manos se remueve del material del fondo quedando así las larvas en la red. Esta operación se repite al menos tres veces en cada sitio seleccionado al azar, pudiéndose así, calcular el número de organismos por metro cuadrado. El material retenido en la red es necesario llevarlo a una bandeja esmaltada para

separar los organismos con la ayuda de pinzas entomológicas (Cantera, Carvajal, y Castro, 2009, p. 192).

Los métodos anteriores pueden complementarse tomando con las manos, piedras, hojas o sustratos similares y con una pinza de punta fina se van tomando los organismos uno a uno y se depositan en un frasco pequeño de alcohol si se desean fijar en el campo; o en un frasco de mayor capacidad (cerca de un litro), si se desea llevar vivos al laboratorio para su cultivo y seguimiento hasta adultos.

Se recomienda que en todos los casos anteriores el sustrato de fondo se deposite en una bandeja blanca, pues allí se pueden observar mejor los organismos capturados.

- Aguas lentas o corrientes con vegetación marginal

La red triangular ("D-net") sujeta a un mango de madera o aluminio es una de las usadas para hacer un barrido a lo largo de las orillas con vegetación. Este muestreo cualitativo, en la cual se atrapan insectos nadadores o que viven adheridos a los tallos y hojas de la vegetación sumergida. Como se explicó anteriormente el material recolectado se coloca en la bandeja blanca.

- Aguas corrientes o aguas lentas profundas

Para este tipo de hábitats es conveniente utilizar una draga la cual facilita la toma de muestras de sedimentos a diferentes profundidades.

La draga Ekman es una de las más utilizadas para las muestras de fondo blando. La draga es un artefacto que consta de palas que cierran el fondo, mediante el envío de una cuerda. Las muestras obtenidas son cuantitativas, en un área de 225 cm² de sedimento cada vez. Esta operación se repite tres veces en cada área de muestreo. El sedimento tomado se deposita en un cernidor (los orificios varían de acuerdo al tipo de sedimento) donde se lava quedando atrapados los organismos recolectados.

La draga Peterson se utiliza para muestrear fondos arenosos fangosos, en especial cuando la profundidad de la capa de agua no permite hacer colectas manuales. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el equipo suministra información cuantitativa porque en cada arrastre se dispone de un área de muestreo determinado. Como en los casos anteriores se recomienda tres réplicas por cada estación de muestreo. Los organismos se separan con pinzas entomológicas del material colectado en la draga, mediante lavado con agua en una bandeja esmaltada y el uso de tamices de ojo de malla de 500 μm (Cantera, Carvajal, y Castro, 2009, p. 192).

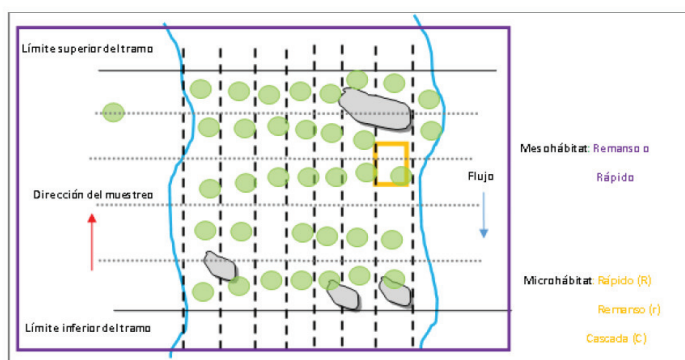
- Método de carriles (FONAG, 2015)

La información biológica se la puede obtener mediante el método de carriles (mapeo del tramo del río) para el cual se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

La toma de muestras se las realiza y registra donde se van a tomar las variables hidráulicas.

El muestreo se realiza a través del trazado (imaginario o con sogas) de una cuadrícula sobre el río como se muestra en la figura 3.19

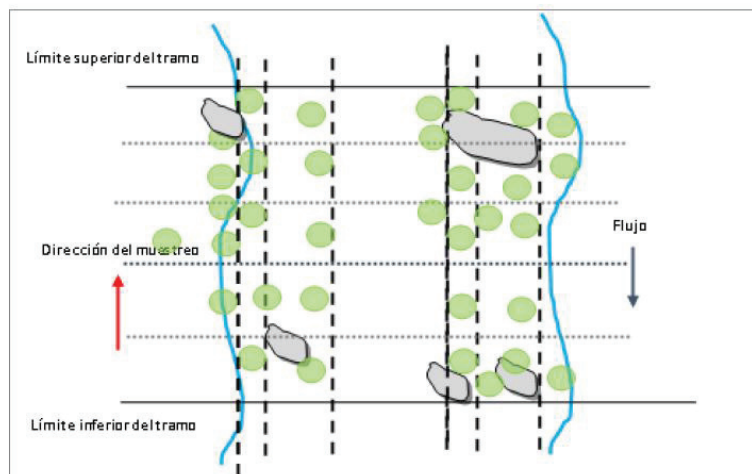
FIGURA 3.19
ESQUEMA DISPOSICIÓN DE CARRILES



FUENTE: Fondo para la Protección del Agua (FONAG), 2015. Simulación de hábitats viables de los ríos: Aglla, Oyacachi y Chalpi Grande. Quito, Ec. 108p.

Para utilizar este método se debe tomar en cuenta el registro de las coordenadas geográficas de los puntos muestreados. El muestreo se inicia desde el límite inferior de tramo hacia arriba y se recoge en forma lateral barriendo cada hábitat posible desde las márgenes hacia el centro del cauce. Hay que considerar las dimensiones de los cauces ya que los carriles debe ajustarse para cubrir la variedad de hábitat que existan entre el hiporreos y la zona de mayor velocidad del flujo, hasta donde sea posible el acceso. Ver figura 3.20.

FIGURA 3.20
ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN FINAL DE LAS ZONAS DE MUESTREO DE ACUERDO CON LA CAPACIDAD DE ACCESO AL RÍO Y LA RESTRICCIÓN DE MUESTREO HACIA LAS MÁRGENES DEL RÍO



FUENTE: Fondo para la Protección del Agua (FONAG), 2051. Simulación de hábitats viables de los ríos: Aglla, Oyacachi y Chalpi Grande. Quito, Ec. 108p.

3.3.3.2 INDICADORES BIÓTICOS

La calidad del agua definida por indicadores bióticos es cada vez más aceptada a nivel mundial como metodología para el monitoreo de los cuerpos de agua. Algunos autores De Gasperi et al 2007; Monk Wood, Hannah y Wilson 2007; Useglio-Polatera et al, 2000 y Poff et al, 2006 han usado el estudio de macro invertebrados en evaluaciones de caudal ecológico y se han considerado los siguientes índices:

Índice de Shannon – Wiener: es una medida de la biodiversidad. Determina la relación entre el número de familias y su abundancia relativa. Permite describir la estructura de las comunidades. Contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza) y cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia).

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (3.29)$$

Donde:

$$P_i = (N_i/N)$$

N_i = número de individuos por familia

N = número de individuos totales

Índice EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera): este índice considera solo la cuantificación de los géneros de insectos acuáticos altamente sensibles a las alteraciones.

$$\text{Índice} = \frac{\text{total de individuos de los órdenes EPT}}{\text{total de organismos encontrados}} \quad (3.30)$$

BMWP (Biological Monitoring Working Party): este índice está basado en la ordenación y ponderación de las especies de macro invertebrados, presentes en las aguas, según su tolerancia a la contaminación orgánica. Dependiendo de la sensibilidad de cada familia a la contaminación se le designa un puntaje. Se requiere conocer a nivel de familia cada uno de los grupos presentes en el sistema acuático. Las puntuaciones asignadas a cada familia de macro invertebrados, según el BMWP que se muestra en la tabla.

TABLA 3.14
PUNTUACIÓN DE LAS FAMILIAS DE MACRO INVERTEBRADOS PARA
OBTENER EL BMWP

| FAMILIA | PUNTUACIÓN |
|--|------------|
| Perlidae, Oligoneuriidae, Helicopsychidae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Lampiridae, Odontoceridae, Blepharoceridae, Psepheniidae, Hidridae, Chordodidae, Lymnessiidae, Polythoridae, Gomphidae. | 10 |
| Leptophlebiidae, Euthyplociidae, Leptoceridae, Xiphocentronidae, Hydrobiidae, Dytiscidae, Polycentropodidae, Hydrobiosidae. | 9 |
| Veliidae, Philopotamidae, Simulidae, Pleidae, Trichodactylidae, Saldidae, Lestidae, Pseudotheipusidae, Pyralidae. | 8 |
| Baetidae, Calopterygidae, Glossossomatidae, Corixidae, Notonectidae, Leptohyphidae, Dixidae, Hyalellidae, Naucoridae, Scirtidae, Drypidae, Pschycodidae, Coenagrionidae, Planariidae, Hydroptilidae. | 7 |
| Ancylidae, Lutrochidae, Noteridae, Aeshnidae, Libellulidae, Elmidae, Staphylinidae, Limnynchidae, Pilidae, Megapodagrionidae, Corydalidae. | 6 |
| Hydrosoychidae, Gelastocoridae, Belostomatidae, Nepidae, Pleuroceridae, Tabanidae, Thiaridae, Pyralidae. | 5 |
| Curculionidae, Chrysomelidae, Mesovelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Gerridae, Scarabidae, Dolycopodidae, Sphaeridae. | 4 |
| Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Physidae, Lyninaeidae, Planorbidae, Hydrometridae, Hydrophilidae, Tipulidae, Ceratopogonidae. | 3 |
| Chironomidae, Culicidae, Muscidae | 2 |
| Oligochaeta | 1 |

FUENTE: (Roldán, 2003, p.170)

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

La suma de los valores correspondientes a cada una de las familias presentes en la zona de estudio, se obtiene la calidad de agua, la que se puede categorizar de acuerdo a las 5 categorías que se muestran en la tabla 3.15.

TABLA 3.15
CALIDAD DE LAS AGUAS SEGÚN EL BMWP

| CALIDAD DE LAS AGUAS SEGÚN EL BMWP | | |
|------------------------------------|------------|--------------------------------|
| CLASE | PUNTUACIÓN | CALIDAD DEL AGUA |
| I | > 120 | Aguas muy limpias |
| | 101 - 120 | Aguas limpias |
| II | 61 - 100 | Aguas ligeramente contaminadas |
| III | 36 - 60 | Aguas contaminadas |
| IV | 16-35 | Aguas muy contaminadas |
| V | < 16 | Aguas fuertemente contaminadas |

FUENTE: (Zamora y Alba, 2009, pp. 332-352)

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

CAPÍTULO 4

GUIA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLOGICO EN RIOS ALTO ANDINOS TROPICALES

En el siguiente capítulo se expone una guía de las etapas que deben ser tratadas en la determinación del caudal ecológico, las consideraciones a tener en cuenta en cualquier ejercicio para el desarrollo del caudal ecológico. Adicionalmente se describe el procedimiento que se ejecutará para la aplicación práctica del ejemplo considerado.

4.1 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN RIOS ALTOANDINOS TROPICALES.

Como todo proceso el cálculo la determinación del caudal ecológico está sujeto a tener en cuenta varias fases para su desarrollo, las misma que incluyen el análisis de la información básica (características de la zona de estudio) donde se delimiten claramente los puntos de interés; selección del método escogido dentro de las metodologías indicadas en los capítulos anteriores; realizar el cálculo y análisis de los resultados los mismo que nos ayudaran a establecer las conclusiones sobre cuál debe ser el caudal ecológico de la zona en estudio.

En la siguiente figura 4.1 se esquematiza las fases con las actividades para llevarse a cabo en la determinación del caudal ecológico.

FIGURA 4.1 FASES Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES–METODOLOGÍA

Recopilación y análisis de la información

- Análisis de marco conceptual referente al caudal ecológico
- Análisis de la normativa en materia de caudal ecológico
- Análisis de los métodos de cálculo para el caudal ecológico.

Metodología de cálculo

- Establecer la metodología a utilizar de acuerdo a las metodologías: hidrológicas, hidráulicas, hidrobiológicas u holísticas.

Cálculo del caudal ecológico

- Delimitar la zona de estudio.
- Caracterizar la zona de estudio.
- Selección del método de cálculo
- Cálculo del caudal ecológico de acuerdo con la zona de estudio y el método seleccionado.

Análisis de resultados

- Se realiza un análisis de los resultados teniendo en cuenta el contexto en el cual se desarrolla el estudio y la información teórica referente al tema.

Recomendaciones

- Una vez realizadas las fases se presentan los lineamientos para la determinación del caudal ecológico

ELABORACIÓN: Verónica Yépez.

4.1.1 RIOS ALTO ANDINOS

La Cordillera de los Andes atraviesa el continente sudamericano de norte a sur y es considerada como una zona donde se concentra una alta heterogeneidad ambiental y una elevada diversidad biológica (Young, 2011, cit. por Villamarín, Prat y Rieradevall, 2014, p. 1073). La elevada altitud y complejidad fisiográfica de esta cadena montañosa influye en la condición de clima (Emck, 2006; Young 2011, cit. por Villamarín, Prat y Rieradevall, 2014, p. 1073), influenciando de forma importante los regímenes hidrológicos de sus ríos (Montgomery, Balco, y Willett, 2001).

Los estudios que se han realizado para caracterizar los ríos Andinos son escasos e indican que son muy variables y muestran fluctuaciones importantes en sus características físicas y químicas (caudal, temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad) (González, Carrillo, y Peñaherrera, 2004; Jørgensen, 2004; Jacobsen y Brodersen, 2008).

La importancia de conocer la variabilidad de los factores físico y químicos de los ríos radica en la influencia de estos sobre la biodiversidad a diferentes niveles.

En el Ecuador como en el resto de los Andes, las principales ciudades se abastecen del agua proveniente de los ríos ubicados en los Páramos (Buytaert, Celleri, Debievre, Cisneros, Wyseure, Deckers y Hosftede, 2007, cit. por Villamarín, Prat y Rieradevall, 2014, p. 1073). Los procesos en los ríos sostienen a la vida de los humanos y otros seres vivos, a través de la combinación de cantidades suficientes de agua en óptimas calidades, que recorren su camino en hábitat fluviales con ecosistemas de riberas en condiciones saludables (Pardo, Álvarez, Casa y Moreno, 2002; Munné, Prat, Solá, Bonada y Rieradevall, 2003). En este sentido, los servicios que proveen los ecosistemas acuáticos pueden verse en conflicto con la demanda por el agua como recurso, para abastecer servicios de agua potable, hidroelectricidad, riego y recreación. Este conflicto se traduce en un desequilibrio del balance hídrico natural. Además existe una proliferación de proyectos y obras de captación para diversos usos, poco o nada se conoce de los efectos puntuales de las estructuras sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres (Rosero, 2005).

Según Josebsen (2007) “Los caudales en los páramos ecuatorianos exhiben grandes variaciones estacionales y de corto plazo en la descarga. Esto podría reflejar la menor variación estacional de las precipitaciones en las tierras ecuatoriales donde las corrientes de páramo se originan y estas corrientes también tiene índices de estabilidad más altos que los caudales de pie de monte amazónicos cercanos”.

El trabajo para definir la cantidad de agua que debe haber en un cauce es una tarea compleja ya que interviene muchas variables pero a pesar de esto las diferentes metodologías han sido probadas a nivel mundial, y se ha observado la recuperación y restauración del funcionamiento de los ecosistemas acuáticos

y la reducción de los conflictos entre el abastecimiento y la conservación (Poff et al. 2003).

En el Ecuador la investigación y esfuerzos en cuanto a la determinación del caudal ecológico se ha concentrado en el aspecto legal e institucional; sin embargo desde el año 2006 el Fondo para la Protección de Agua (FONAG) ha desarrollado estudios para definir caudales ecológicos considerando la simulación de hábitats en los ríos Pita, Papallacta, Guayllabamba, Chalpi Grande, Oyacachi y Aglla.

4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

En el presente trabajo se realizó un análisis de las diferentes metodologías existentes para la determinación del caudal ecológico con el fin de presentar una propuesta que sirva de base. Dentro de las metodologías aplicables se encuentra las hidrológicas que tienen como sustento el caudal que es uno de los factores de mayor importancia en el ecosistema fluvial.

En nuestro país la información hidrológica no es de muy buena calidad, existen estudios realizados que presentan información biológica y socio-económica escasa por lo que es importante proponer un método aplicable a los ríos altoandinos.

La variación hidrológica define de una u otra manera la estructura de la biodiversidad biótica dentro de los ecosistemas ya que las comunidades fluviales han ido evolucionando sometidas a esta variación; es decir que los requerimientos ecológicos están asociados a estas oscilaciones.

Los beneficios de la utilización de los métodos hidrológicos se basan en las siguientes premisas:

- Son de fácil aplicación

- Su análisis se basa en datos hidrológicos
- Son económicos en su aplicación
- Relativamente rápidos de aplicar
- Permiten un análisis de acuerdo al entorno puesto que están ligados al régimen hídrico que es código genético del río.
- Estos métodos son la base para la aplicación de las metodologías hidráulicas, hidrobiológicas y holísticas.

A continuación se presenta la información que se refiere a la delimitación de la zona de estudio, caracterización y cálculo del caudal ecológico de acuerdo con el método seleccionado.

4.2.1 DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En este acápite se describen los factores a tomarse en cuenta dentro de la determinación del caudal ecológico, los mismos que permiten caracterizar la zona de estudio (cuenca hidrográfica).

4.2.1.1 Localización

La zona de estudio se refiere a la cuenca del río Jatunhuaycu ubicado entre las provincias de Napo y Pichincha, forma parte del proyecto La Mica-Quito-Sur ubicado en el sector del volcán Antisana (5753 m), forma parte de la Reserva Ecológica del Antisana.

En la fotografía se puede observar la línea de cumbres de la cuenca del río Jatunhuaycu y en la parte inferior el embalse de La Mica con una capacidad de almacenamiento de 24 millones de metros cúbicos. El agua del Antisana es captada en el sistema La Mica-Quito Sur, los ríos que forman parte de este sistema son: Antisana, Jatunhuaycu y Diguiche.

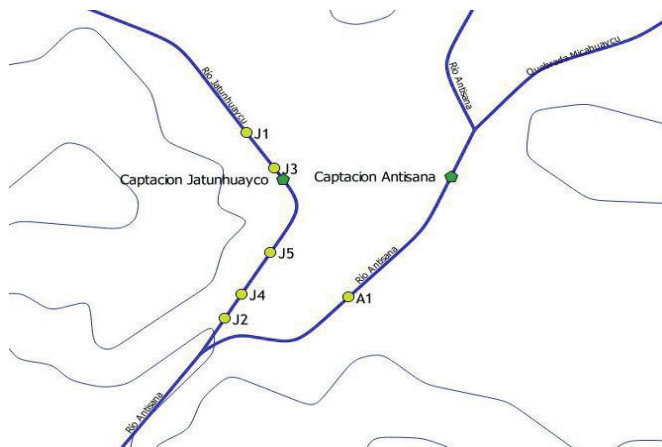
FOTOGRAFÍA: CUENCA RÍO JATUNHUAYCU



FUENTE: GOOGLE EARTH

En la tabla 4.1 se indica las coordenadas UTM de la captación del río Jatunhuaycu y puntos tomados antes y después de la misma.

FIGURA 4.2 COORDENADAS DEL RÍO JATUNHUAYCU



FUENTE: Informe visita técnica realizada a las captaciones de la EPMAPS (reserva ecológica Antisana) EPN.

TABLA 4.1
COORDENADAS UTM RÍO JATUNHUAYCU

| PUNTO | DESCRIPCIÓN | X | Y | ALTITUD (M.S.N.M) |
|-------|---|--------|---------|-------------------|
| 1 | Captación río Antisana | 808504 | 9940423 | 3923 |
| A1 | Río Antisana | 807982 | 9939776 | 3904 |
| 2 | Captación río Jatunhuaycu | 807732 | 9940405 | 3922 |
| J1 | Río Jatunhuaycu antes de la captación | 807594 | 9940688 | 3935 |
| J2 | Río Jatunhuaycu después del puente | 807390 | 9939653 | 3902 |
| J3 | Río Jatunhuaycu tramo con rocas | 807645 | 9940433 | 3934 |
| J4 | Río Jatunhuaycu tramo con rocas | 807518 | 9939779 | 3912 |
| J5 | Río Jatunhuaycu tramo pendiente pronunciada | 807676 | 9940000 | 3919 |

FUENTE: Informe visita técnica realizada a las captaciones de la EPMAPS (reserva ecológica Antisana) EPN.

4.2.1.2 Geología y suelos

La variedad topográfica y la diversidad de sustratos rocosos existentes en el área están relacionados con la edificación de la Cordillera de los Andes, existen rocas que van desde el Paleozoico hasta formaciones superficiales del Cuaternario reciente y actual. Existe relleno vulcano-sedimentario con una cobertura casi continua de cangahua. La topografía y las formas del relieve, obedecen a diferentes condiciones morfoclimáticas, que varían desde las de tipo nival, glacial y peri glacial, alteraciones típicas de dominio tropical húmedo, que a su vez están relacionadas con la influencia absoluta de la Cordillera de los Andes. En la parte norte y central, se hallan expuestas rocas metamórficas, compuestas de esquistos filitas, cuarcitas y gneises principalmente que constituyen el armazón de la Cordillera (Fundación Antisana, 2002, p. 14).

4.2.1.3 Clima

El clima es húmedo con temperaturas que van desde bajo cero hasta los 12° a 18° C. Predominan dos estaciones: invierno de noviembre a febrero y verano de marzo a octubre. Se caracteriza por tener alta irradiación solar, frecuentemente neblina, vientos fuertes y precipitación en forma de agua, granizo o nieve (Black, 1989).

4.2.1.4 Disponibilidad hídrica y usos del agua

Esta zona es una región plena en recursos hídricos con usos potenciales. El potencial del recurso es tal que la ciudad de Quito y gran parte de su área metropolitana aprovecha el recurso para abastecimiento de agua potable, riego, hidroelectricidad y recreación.

Para un futuro y en función de la demanda creciente de agua relacionada con el crecimiento del Distrito Metropolitano de Quito ya se encuentran en estudio algunos proyectos de mayor envergadura como el Proyecto de Ríos Orientales.

4.2.1.5 Zona Protegida

La Reserva Ecológica Antisana es una de las 47 áreas protegidas del Ecuador, se sitúa en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes y es un hábitat de importante diversidad de especies de flora y fauna. Cuenta con una belleza paisajística única.

4.2.1.6 Aspectos Socioeconómicos

Las comunidades de las zonas altas tienen áreas comunales en el páramo, que son cuidadas por sus miembros. Los problemas importantes del área son la quema de pajonal, extracción permanente de leña, escasez de agua, especialmente en verano, y su contaminación con desechos arrojados por las viviendas y pesticidas órgano-fosforados utilizados en los cultivos.

La sobreexplotación de los suelos durante cientos de años y la permanente deforestación del campo han provocado erosión y empobrecimiento del suelo. Esta situación obliga a los habitantes a presionar los recursos del páramo y de la reserva, extendiéndose hacia las tierras altas y, en algunos casos, hacia terrenos de fuerte pendiente, de baja productividad y fácil erosión.

La cuenca hidrográfica que sirve como base para la determinación de caudal ecológico como se mencionó anteriormente está ubicada en la Reserva Ecológica Antisana (REA) creada el 21 de julio de 1993 mediante resolución No. 0018 RA/INEFFAN, publicada en el Registro Oficial No. 265 de 31 de agosto del mismo año. La declaratoria de Reserva Ecológica afectó a numerosas propiedades privadas, la misma que ha representado una imposición que ha afectado su forma tradicional de manejo de los recursos hídricos.

En la zona de influencia, el empleo de la población está determinado por actividades agrícolas, pecuarias y artesanales (crianza de ganado, producción agrícola de cereales y hortalizas, crianza de animales menores para el autoconsumo y el trabajo asalariado). La población que se encuentra estrechamente ligada con la REA está asentada en el área rural, en donde los niveles de analfabetismos de la población adulta son altos.

La explotación de las canteras ubicadas en el derrame lávico junto a la hacienda Pinantura causa un fuerte impacto al ambiente por el uso de dinamita, el ingreso de maquinaria y vehículos que transportan el material hacia los lugares de destino.

4.2.1.7 Aspectos Institucionales

La administración de la reserva ha iniciado un proceso de acercamiento para mejorar la coordinación e involucrar a otras instituciones y actores, a efectos de cumplir con los objetivos de conservación, y solución de problemas, así como para aportar con bienes y servicios para el beneficio de las poblaciones humanas.

La responsabilidad legal para la administración y manejo de la REA le corresponde al Ministerio del Ambiente, es imprescindible contar con el apoyo de otras instituciones y actores directamente involucrados entre los cuales se encuentran:

- Fundación Antisana,
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).
- Municipios de Quijos (Baeza) y Archidona
- Consejo Provincial del Napo (Tena)
- Juntas Parroquiales de Pintag, Papallacta, Cuyuja, Baeza, Cosanga, Cotundo
- Familia Delgado (propietaria de la hacienda Antisana)
- Secretaria del Agua, Instituto para el Ecodesarrollo de la Región Amazónica Ecuatoriana (ECORAE)
- Instituto Nacional de Desarrollo Agrario (INDA)
- Usuarios privados de agua, piscinas y piscicultores
- Petroecuador

4.2.1.8 Proyecto de Desarrollo Regional

El área en estudio forma parte del proyecto Mica-Quito Sur, el objetivo es suministrar de agua potable a una población de 600.000 habitantes de la zona Sur de la ciudad de Quito. La conducción se desarrolla en dirección noroeste hasta llegar al sector El Troje cerca del perímetro urbano del sur de Quito, en donde se ubica la planta de tratamiento. El proyecto está concebido para conducir 1700 l/s.

La presa intercepta las aguas del río Desaguadero que es un drenaje natural de la laguna Micacocha. La longitud de la presa en su corona es de 780 m, con una altura máxima de 15,2 m y ancho de 6 m. Está conformada por un relleno homogéneo compuesto por mezcla de lahar, fluvio glaciar y ceniza volcánica con un filtro chimenea en el eje vertical y uno horizontal en el paramento de aguas abajo. Los taludes son de 1 vertical y 3,5 horizontal aguas arriba y 1 vertical y 2,5 horizontal aguas abajo.

El proyecto consta de tres captaciones para incrementar los caudales que se regulan en el embalse de la Mica: la captación del río Antisana, diseñada para una capacidad de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, la captación del río Jatunhuaycu, afluente del río Antisana, diseñada para una capacidad de 400 l/s . Y la captación del río Diguchi diseñada para una captación de 150 l/s .

Las obras auxiliares de la presa incluyen: obra de toma, desagüe de fondo, cuenco disipador, vertedero de excesos. El túnel de desvío del río Desaguadero sirve como desagüe de fondo del embalse, aloja la tubería de salida de la toma hacia la conducción y tiene una longitud de 110 m con una sección de $4,48 \text{ m}$ de ancho y $4,0 \text{ m}$ de altura.

4.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

En base a la información cartográfica del Instituto Geográfico Militar se determinó el área de la cuenca. Esta cartografía está disponible en la dirección electrónica: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/formulario/>

La caracterización físico – geográficas de la cuenca (Figura 4.3) se resume en una serie de parámetros e indicadores calculados en función del relieve y de las características físicas de la cuenca, a través de su interpretación se verifica en términos hidrológicos el comportamiento y además sirve como fundamento para la determinación del método de cuencas vecinas cuando la cuenca en estudio no posee datos de caudales.

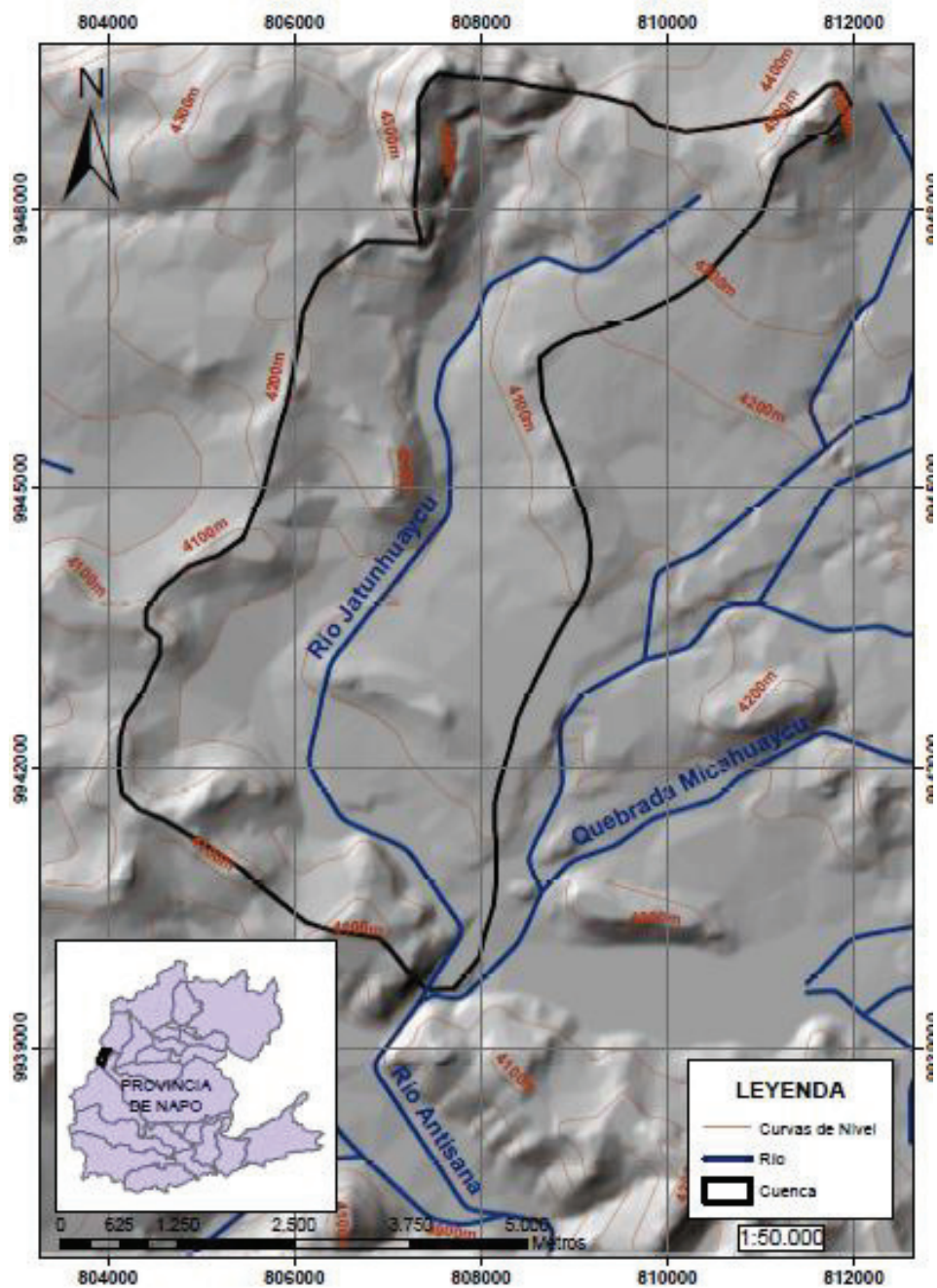
En la tabla 4.2 se muestran las características físico geográficas de la cuenca se puede observar que es oblonga con un coeficiente de forma de $0,38$ por lo que tiende a tener crecidas lentas y sostenidas. Es una cuneca posee un único sistema de drenaje de baja densidad. Es un río sinuoso.

TABLA 4.2
CARACTERISTICAS DE LA CUENCA

| PARAMETROS | NOMECLATURA | CANTIDAD | UNIDAD |
|------------------------------|--------------------|----------|--------------------|
| AREA | A | 32.57 | km ² |
| PERIMETRO | P | 30.24 | km |
| LONGITUD AXIAL | L | 9.90 | km |
| ANCHO | B | 3.80 | km |
| INDICE GRAVELIUS | K _C | 1.49 | - |
| COEFICIENTE DE FORMA | K _f | 0.38 | - |
| INDICE DE ALARGAMIENTO | I _a | 2.61 | - |
| INDICE ASIMETRICO | I _{as} | 1.00 | - |
| LONGITUD DEL CAUCE | L _{Cauce} | 11.90 | - |
| LONGITUD CAUCE (LINEA RECTA) | L _{Total} | 9.00 | km |
| DENSIDAD DE DRENAJE | D _d | 0.37 | km/km ² |
| SINUOSIDAD | S | 1.32 | - |
| COEFICIENTE DE MASIVIDAD | K _m | 130.17 | - |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

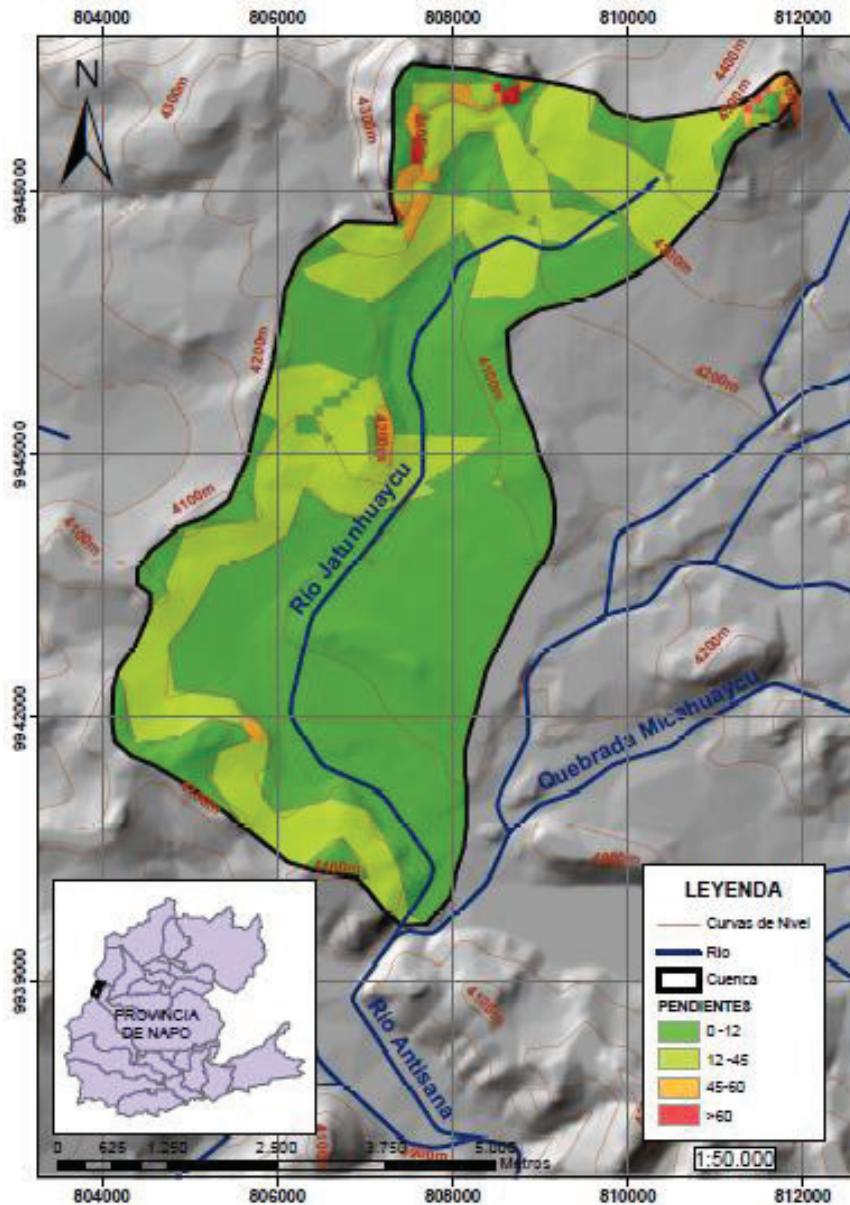
FIGURA 4.3
DELIMITACIÓN DE LA CUNECA DEL RIO JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

En la figura 4.4 se puede observar en mapa de pendientes de la cuenca teniendo como rango en su gran mayoría del 0% al 12%.

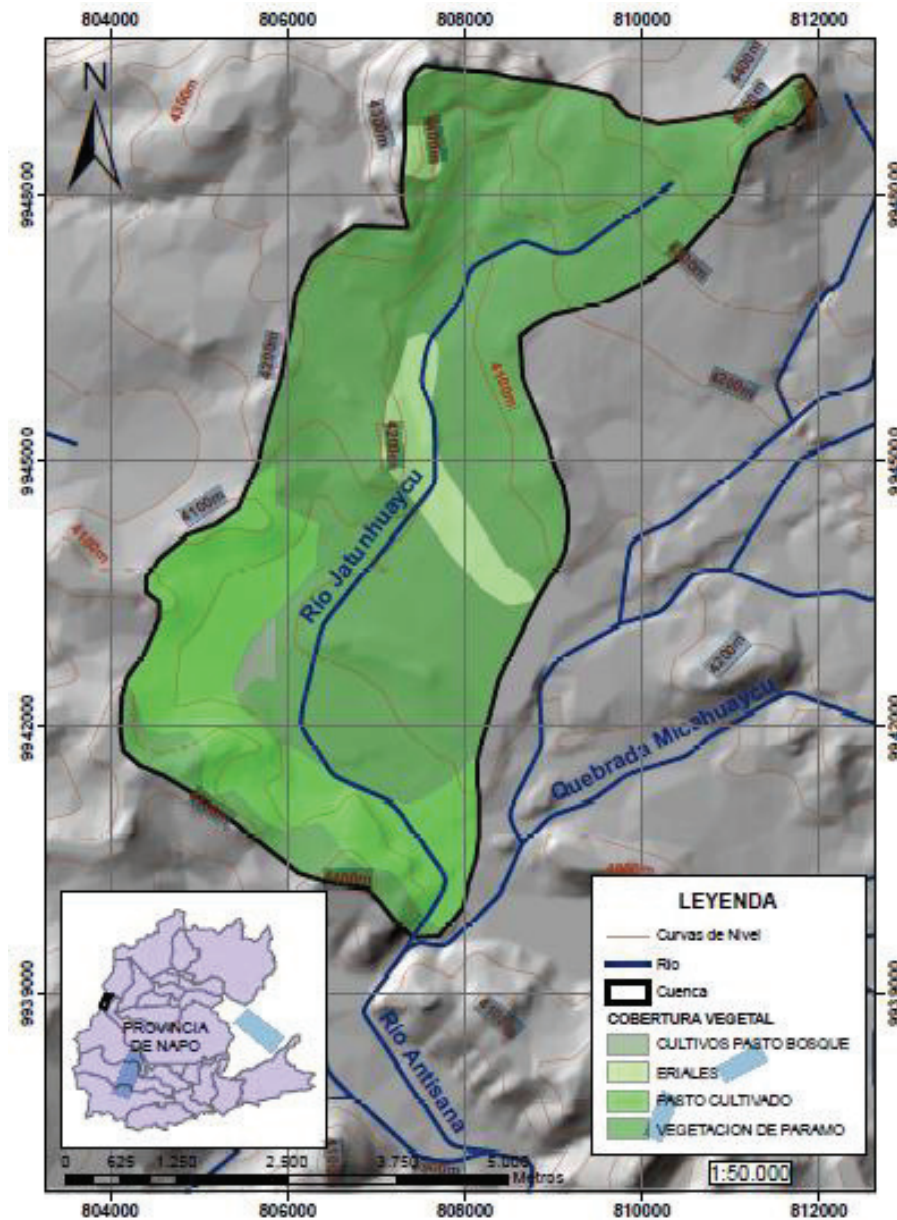
FIGURA 4.4
MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA DEL RIO JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

La cobertura vegetal de la cuenca esta es su mayoría está formada por vegetación de páramo, con un bajo porcentaje de pasto cultivado como se muestra en la figura 4.5.

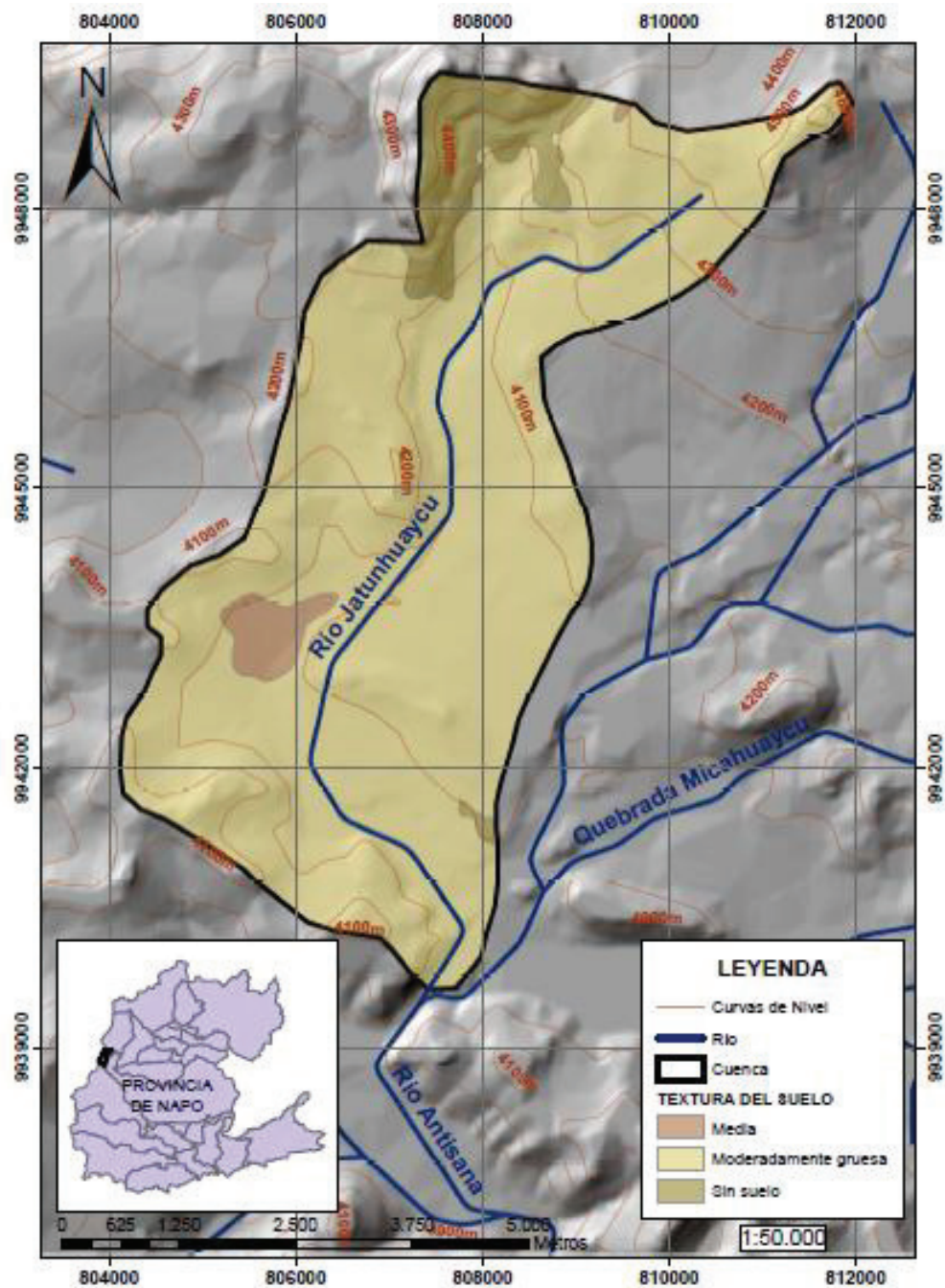
FIGURA 4.5
MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RIO
JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

La textura de suelo corresponde a un suelo moderadamente grueso como se puede ver en la figura 4.6

FIGURA 4.6
MAPA DE TEXTURA DE LA CUENCA DEL RIO JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

4.2.3 DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES TOTALES MEDIAS MENSUALES Y MULTIANUALES.

En la Reserva Ecológica del Antisana existe una red de estaciones las cuales se detallan a continuación y registran las lluvias que se producen a lo largo del año.

TABLA 4.3
COORDENADAS DE LA RED DE ESTACIONES EN LA RESERVA ECOLÓGICA DEL ANTISANA

| ESTACIÓN | X | Y | ALTURA (m.s.n.m) |
|-------------|--------|---------|---------------------|
| GLACIAR | 817123 | 9947944 | 4850 |
| MICA | 809054 | 9942411 | 3930 |
| MORRENA | 816805 | 9948201 | 4785 |
| HUMBOLDT | 810430 | 9943645 | 4059 |
| CRESPOS | 815067 | 9945705 | 4450 |
| TOTALIZADOR | 816271 | 9948470 | 4555 |

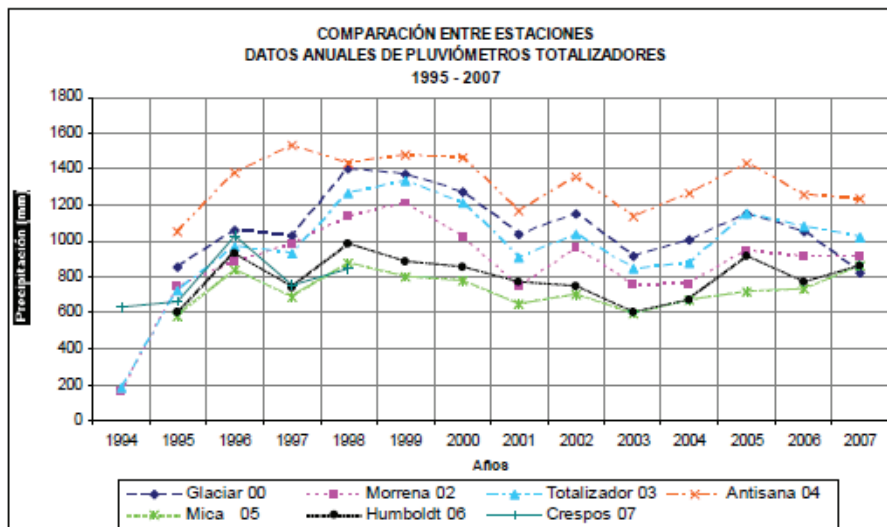
FUNTE: Cáceres, Maisincho, Manciatí, Loyo, Cuenca, Arias, Villacís, Francou, 2009, p. 40

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

Como se puede observar en la figura 4.7 durante los años 1997, 1999 y 2000 se registran un período más lluvioso con un período de disminución en el año 2003.

También se puede observar que las estaciones tienen un comportamiento semejante.

FIGURA 4.7
DATOS ANUALES DE PLUVIÓMETROS DE LAS ESTACIONES EN LA RESERVA ECOLÓGICA DEL ANTISANA.



FUNTE: Cáceres, Maisincho, Manciatí, Loyo, Cuenca, Arias, Villacís, Francou, 2009, p. 59

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

4.2.4 ANÁLISIS DE LOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES MULTIANUALES

La función principal de la zona es la producción de agua a través de la red hidrográfica que nace en los humedales y lagunas de sus páramos y en los bosques montanos. Existe una serie de lagunas que se alimentan de los deshielos del volcán.

A continuación se presenta el análisis de los caudales medios mensuales que fueron tomados de las base de los registro de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).

En la tabla 4.4 se muestran el registro de caudales medios mensuales en (m^3/s) del período comprendido desde 1979 hasta el 2008. Como se pude observar

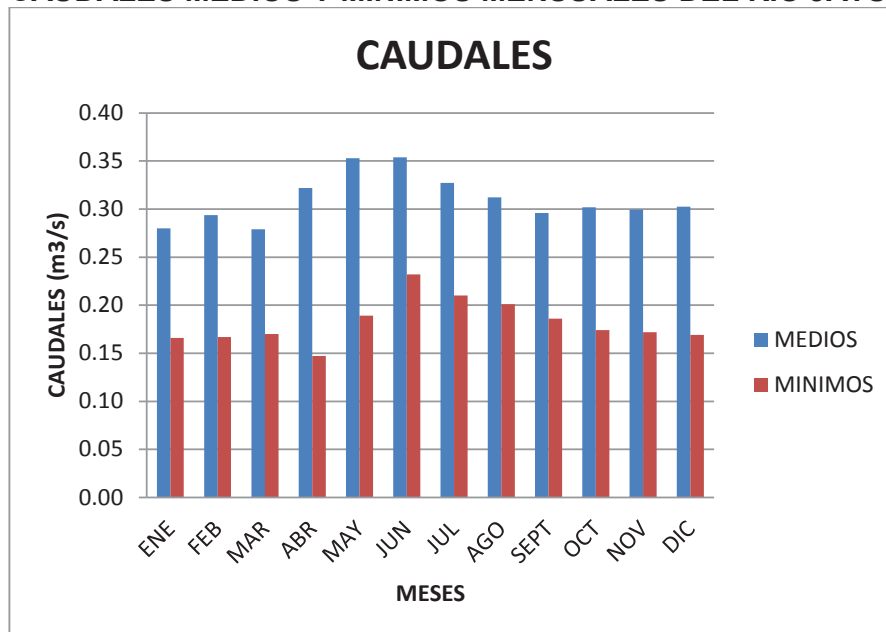
en la figura 4.8 el caudal mínimo es el correspondiente al mes de abril cuyo valor es de 0,147 (m³/s).

TABLA 4.4
CAUDALES MEDIOS MENSUALES DEL RIO JATUNHUAYCU

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1979 | 0.351 | 0.351 | 0.362 | 0.414 | 0.429 | 0.351 | 0.291 | 0.328 | 0.283 | 0.351 | 0.351 | 0.351 |
| 1980 | 0.263 | 0.263 | 0.275 | 0.303 | 0.353 | 0.364 | 0.329 | 0.263 | 0.258 | 0.275 | 0.295 | 0.292 |
| 1981 | 0.219 | 0.242 | 0.248 | 0.267 | 0.258 | 0.235 | 0.306 | 0.290 | 0.248 | 0.246 | 0.270 | 0.270 |
| 1982 | 0.296 | 0.247 | 0.236 | 0.319 | 0.308 | 0.280 | 0.247 | 0.304 | 0.291 | 0.280 | 0.256 | 0.525 |
| 1983 | 0.300 | 0.291 | 0.347 | 0.454 | 0.387 | 0.345 | 0.351 | 0.344 | 0.332 | 0.337 | 0.319 | 0.313 |
| 1984 | 0.299 | 0.349 | 0.299 | 0.427 | 0.369 | 0.409 | 0.375 | 0.336 | 0.392 | 0.359 | 0.379 | 0.322 |
| 1985 | 0.279 | 0.256 | 0.276 | 0.301 | 0.383 | 0.383 | 0.339 | 0.313 | 0.429 | 0.390 | 0.265 | 0.263 |
| 1986 | 0.252 | 0.345 | 0.513 | 0.444 | 0.415 | 0.388 | 0.330 | 0.271 | 0.261 | 0.303 | 0.255 | 0.248 |
| 1987 | 0.243 | 0.403 | 0.257 | 0.328 | 0.384 | 0.304 | 0.300 | 0.297 | 0.291 | 0.323 | 0.315 | 0.291 |
| 1988 | 0.259 | 0.252 | 0.251 | 0.281 | 0.302 | 0.377 | 0.308 | 0.321 | 0.303 | 0.319 | 0.431 | 0.354 |
| 1989 | 0.369 | 0.304 | 0.313 | 0.261 | 0.401 | 0.382 | 0.408 | 0.386 | 0.307 | 0.321 | 0.265 | 0.285 |
| 1990 | 0.274 | 0.271 | 0.253 | 0.288 | 0.380 | 0.343 | 0.277 | 0.287 | 0.294 | 0.283 | 0.290 | 0.311 |
| 1991 | 0.329 | 0.276 | 0.308 | 0.313 | 0.282 | 0.287 | 0.443 | 0.277 | 0.233 | 0.252 | 0.313 | 0.339 |
| 1992 | 0.273 | 0.253 | 0.280 | 0.323 | 0.246 | 0.293 | 0.257 | 0.296 | 0.277 | 0.263 | 0.257 | 0.221 |
| 1993 | 0.287 | 0.305 | 0.276 | 0.319 | 0.360 | 0.327 | 0.280 | 0.254 | 0.255 | 0.284 | 0.278 | 0.279 |
| 1994 | 0.261 | 0.264 | 0.252 | 0.437 | 0.361 | 0.456 | 0.336 | 0.266 | 0.336 | 0.330 | 0.336 | 0.396 |
| 1995 | 0.292 | 0.291 | 0.270 | 0.255 | 0.329 | 0.334 | 0.291 | 0.291 | 0.291 | 0.291 | 0.264 | 0.291 |
| 1996 | 0.262 | 0.311 | 0.311 | 0.256 | 0.366 | 0.311 | 0.405 | 0.311 | 0.283 | 0.311 | 0.311 | 0.293 |
| 1997 | 0.333 | 0.333 | 0.296 | 0.501 | 0.333 | 0.333 | 0.359 | 0.333 | 0.246 | 0.281 | 0.314 | 0.333 |
| 1998 | 0.278 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.347 | 0.341 | 0.331 | 0.488 | 0.331 | 0.350 | 0.341 | 0.263 |
| 1999 | 0.309 | 0.497 | 0.229 | 0.358 | 0.524 | 0.409 | 0.487 | 0.485 | 0.368 | 0.409 | 0.409 | 0.422 |
| 2000 | 0.382 | 0.360 | 0.306 | 0.486 | 0.841 | 0.580 | 0.446 | 0.595 | 0.616 | 0.479 | 0.399 | 0.328 |
| 2001 | 0.368 | 0.430 | 0.382 | 0.353 | 0.427 | 0.416 | 0.414 | 0.308 | 0.339 | 0.340 | 0.281 | 0.285 |
| 2002 | 0.334 | 0.311 | 0.272 | 0.427 | 0.340 | 0.603 | 0.319 | 0.326 | 0.296 | 0.259 | 0.333 | 0.397 |
| 2003 | 0.216 | 0.240 | 0.264 | 0.197 | 0.254 | 0.232 | 0.265 | 0.219 | 0.203 | 0.385 | 0.172 | 0.234 |
| 2004 | 0.306 | 0.208 | 0.174 | 0.203 | 0.225 | 0.243 | 0.211 | 0.225 | 0.191 | 0.184 | 0.295 | 0.205 |
| 2005 | 0.197 | 0.167 | 0.170 | 0.167 | 0.228 | 0.258 | 0.243 | 0.219 | 0.186 | 0.174 | 0.206 | 0.169 |
| 2006 | 0.166 | 0.170 | 0.203 | 0.147 | 0.220 | 0.407 | 0.210 | 0.257 | 0.200 | 0.190 | 0.275 | 0.291 |
| 2007 | 0.215 | 0.227 | 0.209 | 0.247 | 0.189 | 0.266 | 0.284 | 0.201 | 0.253 | 0.203 | 0.229 | 0.223 |
| 2008 | 0.190 | 0.257 | 0.201 | 0.239 | 0.343 | 0.354 | 0.379 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 |
| 2009 | 0.280 | 0.294 | 0.279 | 0.322 | 0.353 | 0.354 | 0.327 | 0.312 | 0.296 | 0.302 | 0.299 | 0.302 |
| MEDIA | 0.280 | 0.294 | 0.279 | 0.322 | 0.353 | 0.354 | 0.327 | 0.312 | 0.296 | 0.302 | 0.299 | 0.302 |

FUENTE: EPMAPS, 2008

FIGURA 4.8
CAUDALES MEDIOS Y MINIMOS MENSUALES DEL RIO JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

4.2.5 DESCRIPCIÓN BREVE DE LA FAUNA ACUATICA

La importancia de esta información radica en que sirve como fundamento para determinar las directrices en la selección del caudal ecológico.

En el área de estudio por sobre los 3800 m.s.n.m se observan macro invertebrados propios de las áreas en buen estado de conservación, con alta presencia de macro-invertebrados de Orden Trichoptera, insectos del orden Ephemeroptera en menor abundancia que los tricópteros y organismos del orden de Chironomidae, y ciertos escarabajos.

4.3 MÉTODO DEL CAUDAL BASE DE MANTENIMIENTO

Como ya se mencionó en el capítulo 2 este método parte de que todos los componentes del hábitat fluvial: composición del sustrato, velocidad, profundidad, calidad del agua, disponibilidad de alimento, vegetación de la rivera dependen del régimen de caudales, es decir que el caudal es la variable independiente. Por lo tanto el caudal y sus variaciones determinaran los factores físicos y bióticos del hábitat fluvial. Este caudal tiene como característica principal mantener la funcionalidad biológica y garantizar la continuidad de las comunidades naturales.

Este método permite contar con una variación de caudales intra-anual ya que como algunos autores lo mencionan Ecuador (Ordoñez, 2010; Moreno 2008); España (Confederación Hidrológica del Duero, 2012); Canadá (Cataraqui Region Conservation Authority, 2005) la variación intra-anual es importante.

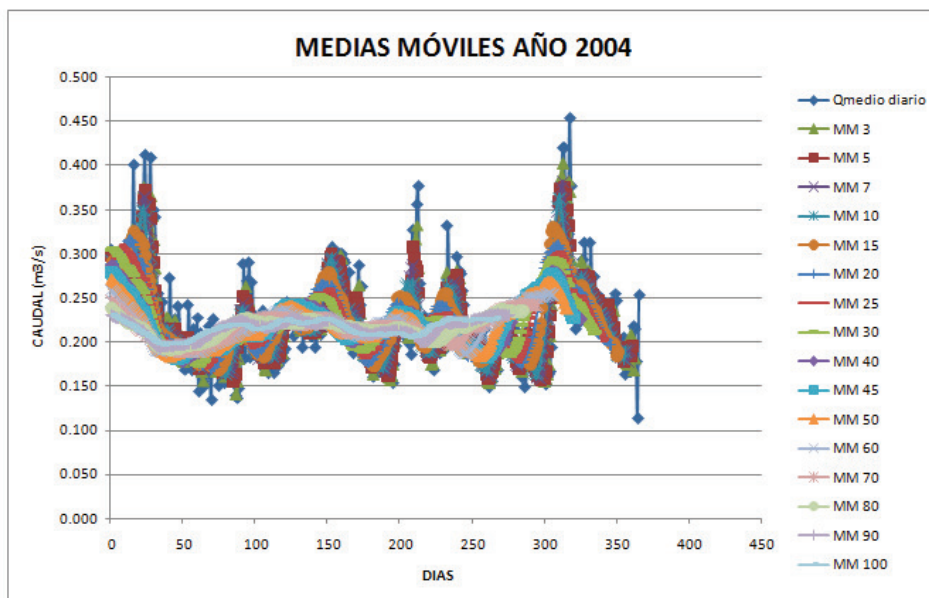
4.3.1 CAUDAL BASE

Para determinar el caudal base se calculan las medias móviles sobre las series históricas y para esto es necesario ordenar la información de acuerdo a los años hidrológicos de tal forma que los valores de los caudales medios diarios mínimos no se encuentren en los extremos del año y sean considerados al realizar esta operación, esto se debe a que el método suprime los datos ubicados en los extremos de las series conforme se incrementa el número de días tomados en cuenta.

Posteriormente se calcula las medias móviles (MM) ver anexo N° 2 en amplitud creciente de 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 para cada año considerado, cada una de estas series permite obtener valores atenuados que se acercan consecutivamente al valor medio anual como se

indica en la figura 4.9. Para cada media móvil se obtiene el valor mínimo, obteniéndose los resultados de la tabla 4.5.

FIGURA 4.9
MEDIA MÓVILES RIO JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 4.5
MEDIAS MÓVILES MÍNIMAS RIO JATUNHUAYCU

| MEDIAS MÓVILES MÍNIMAS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| AÑOS | MM3 | MM5 | MM7 | MM10 | MM15 | MM20 | MM25 | MM30 | MM40 | MM45 | MM50 | MM60 | MM70 | MM80 | MM90 | MM100 |
| 2004 | 0.14 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.20 |
| 2005 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |
| 2006 | 0.12 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |
| 2007 | 0.13 | 0.13 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.21 |
| 2008 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.21 | 0.21 |
| 2009 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.20 |
| MEDIA | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

De las medias móviles mínimas se calcula la media aritmética para obtener la mayor razón de incremento entre cada par de valores consecutivos, los tres mayores se encuentran resaltados en la tabla 4.6.

TABLA 4.6
SERIE DE MEDIAS MÓVILES MÍNIMAS ANUALES

| MM | MEDIA (m ³ /s) | % |
|-----|---------------------------|-------|
| 3 | 0.13 | |
| 5 | 0.138 | 5.73% |
| 7 | 0.144 | 4.30% |
| 10 | 0.150 | 3.86% |
| 15 | 0.159 | 5.97% |
| 20 | 0.162 | 2.47% |
| 25 | 0.166 | 2.34% |
| 30 | 0.168 | 1.32% |
| 40 | 0.176 | 4.33% |
| 45 | 0.178 | 1.40% |
| 50 | 0.181 | 1.51% |
| 60 | 0.187 | 3.48% |
| 70 | 0.191 | 1.91% |
| 80 | 0.192 | 0.45% |
| 90 | 0.192 | 0.38% |
| 100 | 0.193 | 0.24% |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

El caudal base corresponde a la mayor razón de incremento de las tres opciones seleccionadas. En la siguiente tabla se presentan las alternativas de caudal base y los mínimos correspondientes a cada media móvil.

TABLA 4.7
ALTERNATIVAS DE CAUDALES BASE RIO JATUNHUAYCU

| Qb (m ³ /s) | | | Q min (m ³ /s) | | |
|------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| MM5 | MM15 | MM40 | MM5 | MM15 | MM40 |
| 0.138 | 0.159 | 0.176 | 0.108 | 0.140 | 0.161 |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

4.3.2 FACTOR DE VARIABILIDAD TEMPORAL

Para conservar la organización y estructura de las comunidades naturales próximas a las condiciones naturales es necesario considerar la variabilidad del caudal en el tiempo esto se logra aplicando este factor al caudal base (se realiza teniendo en cuenta que el cauce no se encuentra morfométricamente alterado). Este factor permite conservar las tendencias del hidrograma natural, y se calcula según la siguiente ecuación propuesto por Castro (2007):

$$fe = \frac{Qm_i}{Qm_{min}} \quad (4.1)$$

$$fe^* = \sqrt{\frac{Qm_i}{Qm_{min}}} \quad (4.2)$$

Donde:

fe = factor de variabilidad

fe^* = factor de variabilidad atenuado

Qm_i = caudal mensual

Qm_{min} = caudal mensual mínimo

Con el uso de estas ecuaciones se pueden generar dos posibilidades de caudales ecológicos que se determinan de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$Qec = Qb * fe \quad (4.3)$$

$$Qec^* = Qb * fe^* \quad (4.4)$$

Donde:

fe = factor de variabilidad

fe^* = factor de variabilidad atenuado

Qb = caudal base

Qec = caudal ecológico mensual

Qec^* = caudal ecológico mensual atenuado.

CAPÍTULO 5

PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

5.1 HOJA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO.

Para la determinación del caudal ecológico se requiere el registro de caudales mensuales y diarios del río.

5.1.1 BASES DE DATOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES

Es necesario contar con una base de datos que tenga la información correspondiente al nombre del río, una columna con los años y los caudales medios mensuales como se observa en la figura 5.1.

FIGURA 5.1
BASE DE DATOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES

| RÍO | AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| JATUNHUAICO | 1979 | 0.351 | 0.351 | 0.362 | 0.414 | 0.429 | 0.351 | 0.291 | 0.328 | 0.283 | 0.351 | 0.351 | 0.351 |
| JATUNHUAICO | 1980 | 0.263 | 0.263 | 0.275 | 0.303 | 0.353 | 0.364 | 0.329 | 0.263 | 0.258 | 0.275 | 0.295 | 0.292 |
| JATUNHUAICO | 1981 | 0.219 | 0.242 | 0.248 | 0.267 | 0.258 | 0.235 | 0.306 | 0.290 | 0.248 | 0.246 | 0.270 | 0.270 |
| JATUNHUAICO | 1982 | 0.296 | 0.247 | 0.236 | 0.319 | 0.308 | 0.280 | 0.247 | 0.304 | 0.291 | 0.280 | 0.256 | 0.325 |
| JATUNHUAICO | 1983 | 0.300 | 0.291 | 0.347 | 0.454 | 0.387 | 0.345 | 0.351 | 0.344 | 0.332 | 0.337 | 0.319 | 0.313 |
| JATUNHUAICO | 1984 | 0.299 | 0.349 | 0.299 | 0.427 | 0.369 | 0.409 | 0.371 | 0.336 | 0.392 | 0.359 | 0.379 | 0.321 |
| JATUNHUAICO | 1985 | 0.279 | 0.258 | 0.276 | 0.301 | 0.383 | 0.383 | 0.339 | 0.313 | 0.429 | 0.390 | 0.265 | 0.263 |
| JATUNHUAICO | 1986 | 0.252 | 0.345 | 0.513 | 0.444 | 0.415 | 0.388 | 0.330 | 0.271 | 0.261 | 0.303 | 0.255 | 0.248 |
| JATUNHUAICO | 1987 | 0.243 | 0.403 | 0.257 | 0.328 | 0.384 | 0.304 | 0.300 | 0.297 | 0.291 | 0.323 | 0.315 | 0.291 |
| JATUNHUAICO | 1988 | 0.259 | 0.252 | 0.251 | 0.281 | 0.302 | 0.377 | 0.308 | 0.311 | 0.305 | 0.319 | 0.421 | 0.254 |
| JATUNHUAICO | 1989 | 0.369 | 0.304 | 0.313 | 0.261 | 0.401 | 0.382 | 0.408 | 0.386 | 0.307 | 0.321 | 0.265 | 0.285 |
| JATUNHUAICO | 1990 | 0.274 | 0.271 | 0.253 | 0.288 | 0.380 | 0.343 | 0.277 | 0.287 | 0.294 | 0.283 | 0.290 | 0.311 |
| JATUNHUAICO | 1991 | 0.329 | 0.276 | 0.308 | 0.313 | 0.282 | 0.287 | 0.443 | 0.277 | 0.233 | 0.252 | 0.313 | 0.339 |
| JATUNHUAICO | 1992 | 0.273 | 0.253 | 0.280 | 0.323 | 0.246 | 0.293 | 0.257 | 0.296 | 0.277 | 0.263 | 0.257 | 0.221 |
| JATUNHUAICO | 1993 | 0.287 | 0.305 | 0.276 | 0.319 | 0.360 | 0.327 | 0.280 | 0.254 | 0.255 | 0.284 | 0.278 | 0.279 |
| JATUNHUAICO | 1994 | 0.261 | 0.264 | 0.232 | 0.437 | 0.361 | 0.456 | 0.336 | 0.266 | 0.336 | 0.330 | 0.336 | 0.396 |
| JATUNHUAICO | 1995 | 0.292 | 0.291 | 0.270 | 0.255 | 0.329 | 0.334 | 0.291 | 0.291 | 0.291 | 0.291 | 0.264 | 0.291 |
| JATUNHUAICO | 1996 | 0.262 | 0.311 | 0.311 | 0.256 | 0.366 | 0.311 | 0.405 | 0.311 | 0.283 | 0.311 | 0.311 | 0.293 |
| JATUNHUAICO | 1997 | 0.333 | 0.333 | 0.286 | 0.501 | 0.333 | 0.333 | 0.359 | 0.333 | 0.246 | 0.261 | 0.314 | 0.333 |
| JATUNHUAICO | 1998 | 0.276 | 0.243 | 0.341 | 0.341 | 0.347 | 0.341 | 0.331 | 0.468 | 0.331 | 0.350 | 0.341 | 0.253 |
| JATUNHUAICO | 1999 | 0.309 | 0.497 | 0.229 | 0.358 | 0.524 | 0.409 | 0.487 | 0.485 | 0.368 | 0.409 | 0.409 | 0.422 |
| JATUNHUAICO | 2000 | 0.382 | 0.360 | 0.306 | 0.486 | 0.841 | 0.580 | 0.446 | 0.595 | 0.616 | 0.479 | 0.399 | 0.328 |
| JATUNHUAICO | 2001 | 0.368 | 0.430 | 0.382 | 0.353 | 0.427 | 0.416 | 0.414 | 0.308 | 0.339 | 0.340 | 0.281 | 0.285 |
| JATUNHUAICO | 2002 | 0.334 | 0.311 | 0.272 | 0.427 | 0.340 | 0.803 | 0.319 | 0.306 | 0.296 | 0.259 | 0.333 | 0.397 |
| JATUNHUAICO | 2003 | 0.216 | 0.240 | 0.264 | 0.197 | 0.254 | 0.232 | 0.265 | 0.219 | 0.203 | 0.385 | 0.172 | 0.234 |
| JATUNHUAICO | 2004 | 0.306 | 0.208 | 0.174 | 0.203 | 0.225 | 0.243 | 0.211 | 0.225 | 0.191 | 0.184 | 0.295 | 0.205 |
| JATUNHUAICO | 2005 | 0.187 | 0.187 | 0.170 | 0.187 | 0.228 | 0.258 | 0.243 | 0.219 | 0.186 | 0.174 | 0.208 | 0.169 |
| JATUNHUAICO | 2006 | 0.168 | 0.170 | 0.203 | 0.147 | 0.220 | 0.407 | 0.210 | 0.257 | 0.205 | 0.190 | 0.276 | 0.291 |
| JATUNHUAICO | 2007 | 0.215 | 0.227 | 0.209 | 0.247 | 0.189 | 0.206 | 0.204 | 0.201 | 0.250 | 0.203 | 0.229 | 0.223 |

ELABORACIÓN: VERÓNICA YÉPEZ

5.1.2 HOJA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR EL CAUDAL ECOLOGICO.

Una vez ingresados los datos en la base (hoja BD) en la siguiente hoja (Qan) es necesario actualizar los datos de origen como se muestra en la figura 5.2. En el menú de herramientas (Opciones) se escoge (Cambiar origen de datos). Una vez actualizada la tabla dinámica en la parte izquierda podemos escoger el río y los años para los cuales queremos determinar el caudal medio mensual como el caudal medio multianual ver figura 5.3

FIGURA 5.2
PANTALLA DE ACTUALIZACIÓN (CAMBIAR ORIGEN DE DATOS)

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a PivotTable and a PivotTable List. The PivotTable is titled "CAUDAL ECOLOGICO" and has the following data:

| RIO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | PROMEDIO | % | Q.ecol |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----|--------|
| JATUNHUAICO | 0.280 | 0.294 | 0.279 | 0.322 | 0.353 | 0.354 | 0.327 | 0.312 | 0.296 | 0.302 | 0.299 | 0.302 | 0.310 | 10% | 0.031 |

The PivotTable List on the right shows the following fields selected for the report:

- Report Filter: RIO, AÑO
- Column Labels: ENE, FEB, MAR, ABR, MAY, JUN, JUL, AGO, SEPT, OCT, NOVIEMBRE, DICIEMBRE
- Row Labels: AÑO
- Values: Values

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

FIGURA 5.3
HOJA CAUDAL MEDIO MENSUAL MULTIANUAL

| CAUDAL ECOLOGICO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | PROMEDIO | % | Q.ecol |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|---|--------|
| 2004 | 0.106 | 0.208 | 0.174 | 0.205 | 0.255 | 0.243 | 0.211 | 0.225 | 0.191 | 0.184 | 0.195 | 0.205 | | | |
| 2005 | 0.107 | 0.167 | 0.181 | 0.218 | 0.258 | 0.245 | 0.239 | | 0.168 | 0.174 | 0.206 | 0.188 | | | |
| 2006 | 0.166 | 0.170 | 0.203 | 0.147 | 0.220 | 0.407 | 0.220 | 0.257 | 0.200 | 0.190 | 0.275 | 0.291 | | | |
| 2007 | 0.210 | 0.227 | 0.209 | 0.247 | 0.189 | 0.286 | 0.284 | 0.201 | 0.253 | 0.203 | 0.229 | 0.223 | | | |
| 2008 | 0.180 | 0.237 | 0.241 | 0.229 | 0.241 | 0.154 | 0.179 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | | | |
| 2009 | 0.280 | 0.236 | 0.279 | 0.212 | 0.303 | 0.154 | 0.227 | 0.212 | 0.296 | 0.302 | 0.299 | 0.302 | | | |
| Caudal base | 0.236 | 0.230 | 0.236 | 0.221 | 0.240 | 0.154 | 0.179 | 0.188 | 0.234 | 0.232 | 0.244 | 0.246 | | | |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

En la hoja (MM) es necesario ingresar los caudales medios diarios (figura 5.4) con el objetivo de calcular las medias móviles que permiten determinar el caudal base correspondiente al caudal con el mayor incremento relativo.

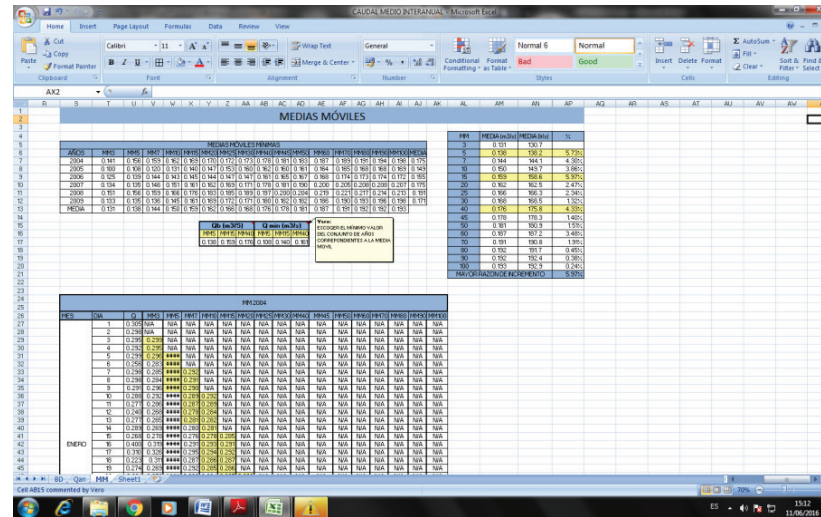
FIGURA 5.4
DATOS CAUDALES MEDIOS DIARIOS

| Q.ecol (m³/s) | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.305 | 0.251 | 0.144 | 0.288 | 0.246 | 0.307 | 0.165 | 0.266 | 0.242 | 0.187 | 0.360 | 0.226 |
| 2 | 0.298 | 0.254 | 0.210 | 0.180 | 0.240 | 0.300 | 0.165 | 0.210 | 0.207 | 0.223 | 0.274 | 0.248 |
| 3 | 0.299 | 0.249 | 0.193 | 0.228 | 0.238 | 0.297 | 0.170 | 0.196 | 0.188 | 0.207 | 0.253 | 0.254 |
| 4 | 0.292 | 0.184 | 0.155 | 0.205 | 0.236 | 0.294 | 0.191 | 0.229 | 0.190 | 0.211 | 0.269 | 0.248 |
| 5 | 0.299 | 0.248 | 0.190 | 0.289 | 0.241 | 0.301 | 0.170 | 0.218 | 0.190 | 0.202 | 0.290 | 0.248 |
| 6 | 0.296 | 0.196 | 0.163 | 0.183 | 0.207 | 0.258 | 0.221 | 0.195 | 0.164 | 0.214 | 0.336 | 0.234 |
| 7 | 0.298 | 0.193 | 0.201 | 0.287 | 0.240 | 0.300 | 0.167 | 0.198 | 0.187 | 0.194 | 0.326 | 0.243 |
| 8 | 0.298 | 0.189 | 0.217 | 0.205 | 0.240 | 0.300 | 0.183 | 0.195 | 0.208 | 0.176 | 0.419 | 0.211 |
| 9 | 0.292 | 0.226 | 0.184 | 0.226 | 0.235 | 0.293 | 0.178 | 0.185 | 0.209 | 0.170 | 0.400 | 0.223 |
| 10 | 0.288 | 0.272 | 0.184 | 0.229 | 0.232 | 0.290 | 0.178 | 0.170 | 0.217 | 0.184 | 0.369 | 0.203 |
| 11 | 0.277 | 0.182 | 0.226 | 0.201 | 0.224 | 0.212 | 0.162 | 0.168 | 0.218 | 0.199 | 0.314 | 0.245 |
| 12 | 0.246 | 0.181 | 0.166 | 0.180 | 0.199 | 0.241 | 0.159 | 0.191 | 0.196 | 0.189 | 0.321 | 0.221 |
| 13 | 0.277 | 0.183 | 0.167 | 0.180 | 0.221 | 0.279 | 0.156 | 0.214 | 0.170 | 0.149 | 0.453 | 0.220 |
| 14 | 0.289 | 0.226 | 0.181 | 0.226 | 0.229 | 0.233 | 0.150 | 0.197 | 0.176 | 0.162 | 0.577 | 0.220 |
| 15 | 0.268 | 0.205 | 0.191 | 0.170 | 0.216 | 0.218 | 0.154 | 0.188 | 0.214 | 0.213 | 0.779 | 0.247 |
| 16 | 0.400 | 0.241 | 0.204 | 0.198 | 0.226 | 0.188 | 0.195 | 0.189 | 0.195 | 0.211 | 0.226 | 0.201 |
| 17 | 0.228 | 0.208 | 0.197 | 0.176 | 0.214 | 0.208 | 0.220 | 0.199 | 0.164 | 0.202 | 0.213 | 0.191 |
| 18 | 0.223 | 0.191 | 0.186 | 0.164 | 0.207 | 0.226 | 0.221 | 0.204 | 0.149 | 0.209 | 0.251 | 0.184 |
| 19 | 0.274 | 0.189 | 0.154 | 0.206 | 0.207 | 0.235 | 0.221 | 0.192 | 0.154 | 0.204 | 0.221 | 0.184 |
| 20 | 0.281 | 0.191 | 0.163 | 0.216 | 0.220 | 0.287 | 0.246 | 0.232 | 0.195 | 0.188 | 0.236 | 0.205 |
| 21 | 0.239 | 0.148 | 0.165 | 0.205 | 0.193 | 0.241 | 0.207 | 0.270 | 0.171 | 0.179 | 0.268 | 0.163 |
| 22 | 0.242 | 0.171 | 0.199 | 0.164 | 0.210 | 0.262 | 0.225 | 0.233 | 0.173 | 0.165 | 0.294 | 0.196 |
| 23 | 0.232 | 0.240 | 0.181 | 0.181 | 0.227 | 0.193 | 0.243 | 0.213 | 0.168 | 0.170 | 0.313 | 0.196 |
| 24 | 0.413 | 0.197 | 0.189 | 0.182 | 0.219 | 0.179 | 0.234 | 0.245 | 0.187 | 0.158 | 0.247 | 0.168 |
| 25 | 0.399 | 0.168 | 0.198 | 0.173 | 0.206 | 0.183 | 0.197 | 0.268 | 0.189 | 0.199 | 0.243 | 0.166 |
| 26 | 0.341 | 0.223 | 0.198 | 0.180 | 0.220 | 0.200 | 0.189 | 0.228 | 0.207 | 0.193 | 0.260 | 0.192 |
| 27 | 0.341 | 0.180 | 0.188 | 0.183 | 0.215 | 0.203 | 0.232 | 0.267 | 0.210 | 0.193 | 0.313 | 0.188 |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

En la parte derecha de la hoja de cálculo (MM) se determinan las medias móviles ver figura 5.5 de acuerdo al número de años considerados se debe tener en cuenta que se escoge los valores con el mayor incremento relativo y el valor correspondiente al mínimo de la media móvil de acuerdo con el valor del caudal base.

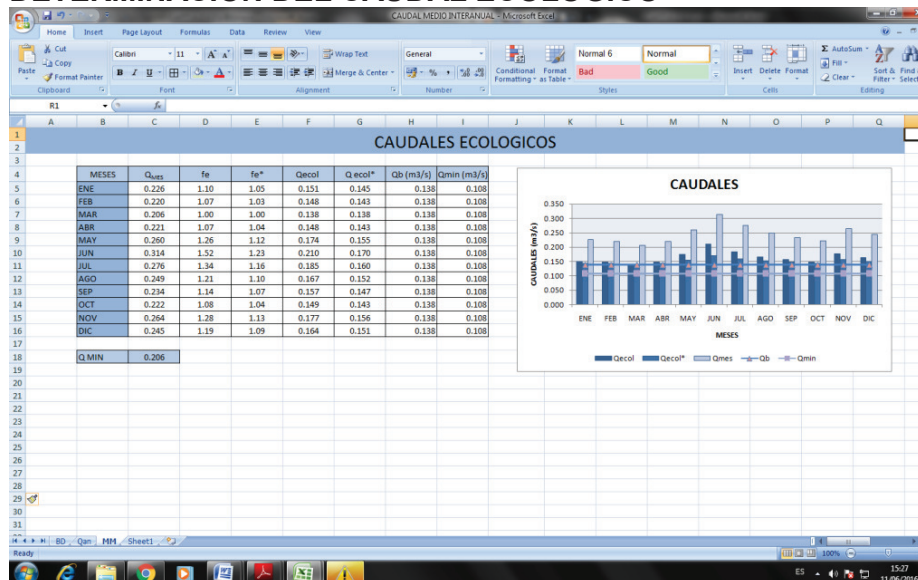
**FIGURA 5.5
CÁLCULO DE LA MEDIA MOVIL**



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

Una vez que se ingresen los valores de los caudales medios diarios en la hoja de cálculo (MM) un año abajo del otro se determinan automáticamente los caudales como se indica en la figura 5.6.

**FIGURA 5.6
DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO**



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

5.2 EJEMPLO DE CÁLCULO

En la tabla 5.1 y figura 5.7 se presenta el régimen de caudales ecológicos para el río Jatunhuaycu considerando los aspectos tratados en los capítulos anteriores. Los datos para la determinación del caudal ecológico se encuentran en el anexo N° 1.

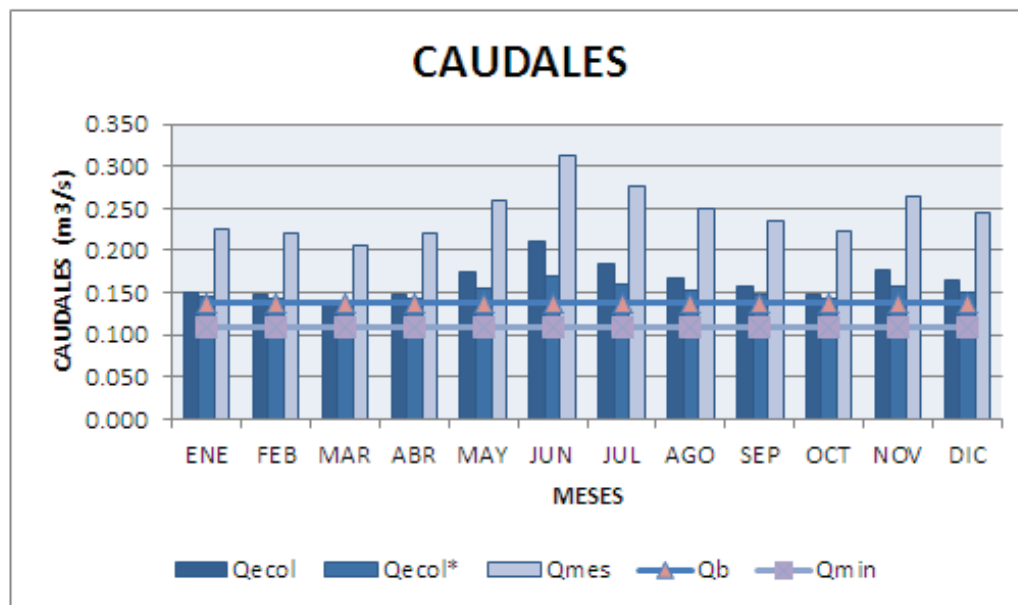
Para el cálculo de los caudales ecológicos es importante tener en cuenta que durante épocas de sequía es probable que se presenten situaciones extremas con caudales naturales inferiores. En estas situaciones el análisis de media móviles se realiza de forma análoga al presentado para el establecimiento del caudal base, pero para este caso se propone que el caudal mínimo circulante será el correspondiente a la aplicación del factor de variabilidad atenuado sobre el mínimo obtenido para la misma media móvil que definió el caudal base. Se recomienda que este caudal permanezca en el cauce únicamente para el tiempo en que fue calculado, en el caso del ejemplo del río Jatunhuaycu para 5 días como se muestra en la tabla 5.1 y figura 5.7

TABLA 5.1
CAUDALES ECOLÓGICOS (m³/s) RIO JATUNHUAYCU

| MESES | Q _{MES} | fe | fe* | Q _{ec} | Q _{ec} * | Q _b (m ³ /s) | Q _{min} (m ³ /s) |
|-------|------------------|------|------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|---|
| ENE | 0.226 | 1.10 | 1.05 | 0.151 | 0.145 | 0.138 | 0.108 |
| FEB | 0.220 | 1.07 | 1.03 | 0.148 | 0.143 | | |
| MAR | 0.206 | 1.00 | 1.00 | 0.138 | 0.138 | | |
| ABR | 0.221 | 1.07 | 1.04 | 0.148 | 0.143 | | |
| MAY | 0.260 | 1.26 | 1.12 | 0.174 | 0.155 | | |
| JUN | 0.314 | 1.52 | 1.23 | 0.210 | 0.170 | | |
| JUL | 0.276 | 1.34 | 1.16 | 0.185 | 0.160 | | |
| AGO | 0.249 | 1.21 | 1.10 | 0.167 | 0.152 | | |
| SEP | 0.234 | 1.14 | 1.07 | 0.157 | 0.147 | | |
| OCT | 0.222 | 1.08 | 1.04 | 0.149 | 0.143 | | |
| NOV | 0.264 | 1.28 | 1.13 | 0.177 | 0.156 | | |
| DIC | 0.245 | 1.19 | 1.09 | 0.164 | 0.151 | | |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

FIGURA 5.7
CAUDALES ECOLÓGICOS RÍO JATUNHUAYCU



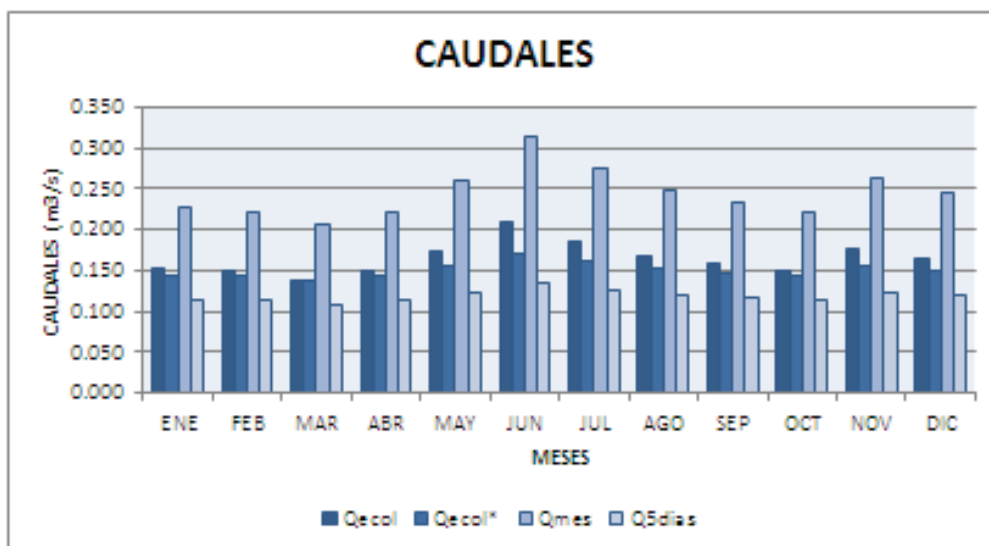
ELABORACIÓN: Verónica Yépez

TABLA 5.2
CAUDALES ECOLÓGICOS (m³/s) PARA 5 DÍAS

| MESES | Q _{MES} | Q _{ec} | Q _{ec} * | Q _{ec} 5 días |
|-------|------------------|-----------------|-------------------|------------------------|
| ENE | 0.226 | 0.151 | 0.145 | 0.114 |
| FEB | 0.220 | 0.148 | 0.143 | 0.112 |
| MAR | 0.206 | 0.138 | 0.138 | 0.108 |
| ABR | 0.221 | 0.148 | 0.143 | 0.112 |
| MAY | 0.260 | 0.174 | 0.155 | 0.122 |
| JUN | 0.314 | 0.210 | 0.170 | 0.134 |
| JUL | 0.276 | 0.185 | 0.160 | 0.125 |
| AGO | 0.249 | 0.167 | 0.152 | 0.119 |
| SEP | 0.234 | 0.157 | 0.147 | 0.116 |
| OCT | 0.222 | 0.149 | 0.143 | 0.113 |
| NOV | 0.264 | 0.177 | 0.156 | 0.123 |
| DIC | 0.245 | 0.164 | 0.151 | 0.118 |

ELABORACIÓN: Verónica Yépez

FIGURA 5.8
CAUDALES ECOLÓGICOS PARA 5 DÍAS



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

En la tabla 5.3 y figura 5.9 se indica los valores de los caudales ecológicos de acuerdo con el método de Tessman, porcentajes fijo y curva de duración general (ver figura 5.10) y podemos observar que con el método de la curva de duración general el caudal ecológico corresponde a $0.166 \text{ (m}^3/\text{s)}$ con una diferencia de $0,14 \text{ (m}^3/\text{s)}$ con el caudal correspondiente al 10% del método de porcentaje fijo diferencia que tiene un porcentaje de incremento del 592%.

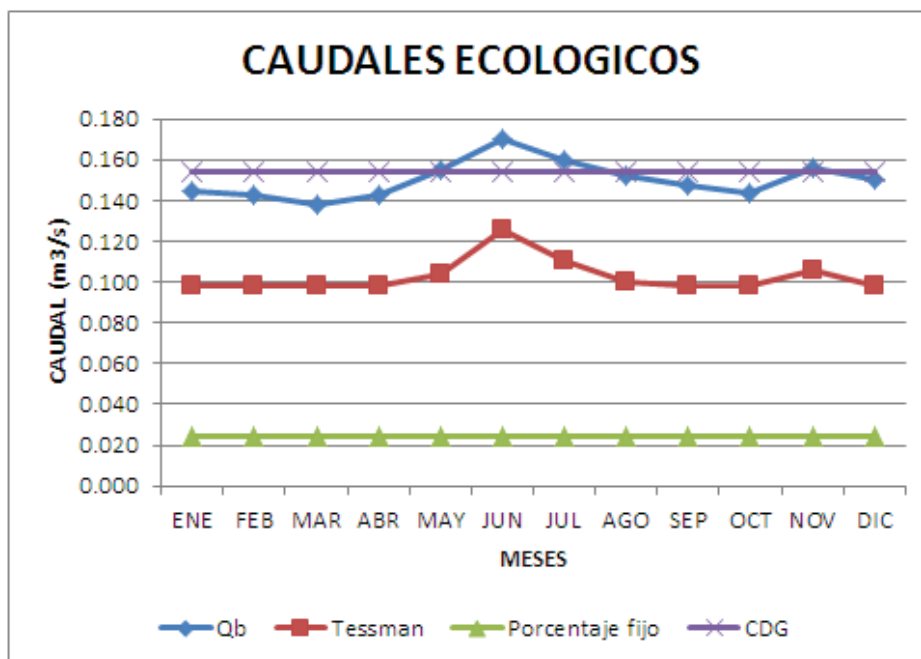
Mientras que la diferencia en porcentaje de los caudales calculados por los métodos del Caudal Base y Tessman está entre el 36% al 54%.

TABLA 5.3
CAUDALES ECOLÓGICOS (m³/s) OTROS MÉTODOS

| MESES | Q _{MES} | CAUDAL BASE | | TESSMAN | PORCENTAJE FIJO | CDG (Q ₉₅) | CDG (Q ₉₀) |
|-------|------------------|-------------|-------|---------|-----------------|------------------------|------------------------|
| ENE | 0.226 | 0.151 | 0.145 | 0.098 | 0.024 | 0.154 | 0.166 |
| FEB | 0.220 | 0.148 | 0.143 | 0.098 | | | |
| MAR | 0.206 | 0.138 | 0.138 | 0.098 | | | |
| ABR | 0.221 | 0.148 | 0.143 | 0.098 | | | |
| MAY | 0.260 | 0.174 | 0.155 | 0.104 | | | |
| JUN | 0.314 | 0.210 | 0.170 | 0.125 | | | |
| JUL | 0.276 | 0.185 | 0.160 | 0.110 | | | |
| AGO | 0.249 | 0.167 | 0.152 | 0.100 | | | |
| SEP | 0.234 | 0.157 | 0.147 | 0.098 | | | |
| OCT | 0.222 | 0.149 | 0.143 | 0.098 | | | |
| NOV | 0.264 | 0.177 | 0.156 | 0.106 | | | |
| DIC | 0.245 | 0.164 | 0.151 | 0.098 | | | |

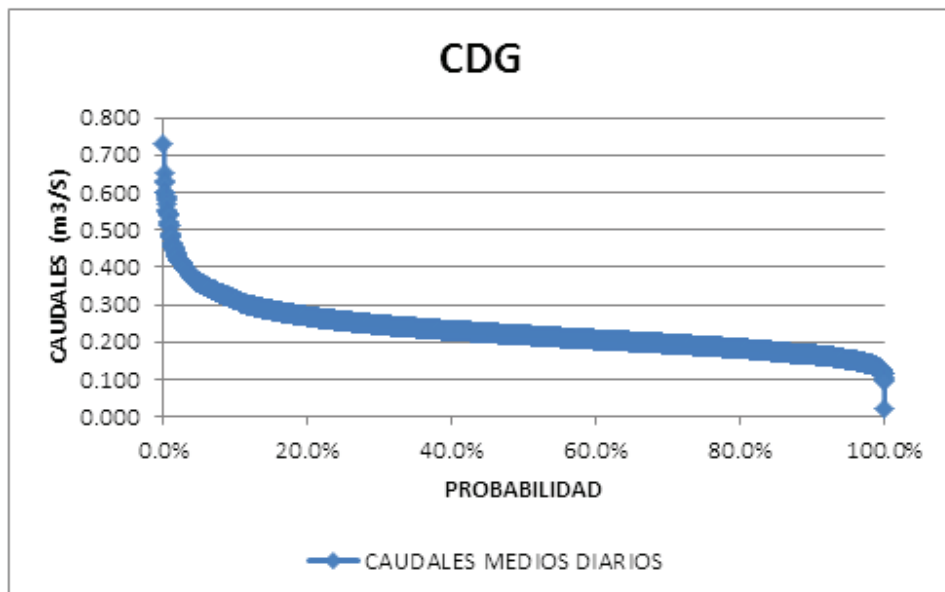
ELABORACIÓN: Verónica Yépez

FIGURA 5.9
CAUDAL ECOLÓGICO OTROS MÉTODOS



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

FIGURA 5.10
CURVA DE DURACIÓN GENERAL JATUNHUAYCU



ELABORACIÓN: Verónica Yépez

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las consideraciones para la determinación del caudal ecológico han evolucionado con el pasar del tiempo, proponiendo desde metodologías que brindan una noción exclusivamente extractiva hasta las tendencias actuales que permiten determinar un régimen de caudales propendiendo a la preservación de las funciones sociales, económicas y ambientales de los cuerpos hídricos.

Existe una variedad de métodos para determinar el caudal ecológico, estos métodos se han adaptado de acuerdo con las características de los ecosistemas propios de cada país, es por esto que se debe considerar dentro de la Legislación un método propio que considere las particularidades de los ecosistemas no solo Altoandinos sino tropicales y sobre todo que parta de bases propias de nuestros ecosistemas (diversos), considerando sobre todo las características biológicas de nuestros ríos.

La determinación del caudal ecológico no debe estar supeditada a la selección de un procedimiento en específico, por el contrario es importante determinar el objetivo aplicable en el cual se evidencie una planificación del recurso hídrico y se tome en cuenta:

- El uso y aprovechamiento del recurso hídrico, para otorgar el derecho al uso del agua con sustento teórico y práctico.
- Protección del entorno, ecosistema estratégico, sensible, espacio de especial interés (Páramo).

- Conservar una especie vegetal o faunística, aquellas especies que presentan algún grado de vulnerabilidad.
- Garantizar la calidad del recursos hídrico.
- Responder a un mandato de una política, norma o ley sobre el manejo y uso del recurso hídrico.
- Conservación de la estética de medio para fines turísticos.

La selección del método para el cálculo de caudales ecológicos debe obedecer al establecimiento de criterios básicos de acuerdo con el enfoque escogido y que esté de acuerdo con el entorno, tomando en cuenta la disponibilidad de los recursos económicos, humanos, de información, de tiempo, aspectos que inclinarán la balanza en la selección del método. Adicionalmente es importante tener en cuenta el marco normativo.

El escoger el método de cálculo debe responder a la conservación del medio ambiente desde diversos puntos de vista es decir un Manejo Integral del Recursos Hídrico que no solo tome en cuenta el criterio técnico sino también el punto de vista político, social y económico, en procura de tomar decisiones que integren el manejo adecuado del agua.

Considerar como caudal ecológico el 10% de caudal medio multianual (método de Tennant) para ríos altoandinos no es muy apropiado ya que este caudal sirve como referencia para sostener la vida acuática en un período corto de tiempo; las condiciones de supervivencia a largo plazo requieren de caudales más altos en especial es épocas de lluvia de acuerdo con este método, además que Tennant recomendaba generar avenida anuales para renovar el hábitat.

Para ríos altoandinos tropicales es importante determinar los caudales ecológicos a través de métodos que determinen una variabilidad intra-anual, pues someter a los ecosistemas a un solo caudal puede generar una cadena de efectos que produzcan ambientes alterados que cambien la dinámica del hábitat y que pueden causar efectos irreversibles en los ecosistemas.

Es importante determinar un régimen de caudales pues los ecosistemas se han adaptado a estos y son dependientes de estas variaciones por lo que el método escogido nos brinda la posibilidad de calcular una variación de caudales ecológicos mensuales que se determinan de acuerdo a la variación temporal. Además permite el cálculo de caudales mínimos inferiores a los usuales que se deben mantener de acuerdo con el período de tiempo para el cual fue considerado.

Dentro de las metodologías presentadas se tomó en cuenta los métodos hidrológicos por ser la base en el desarrollo de estas, hay que tener en cuenta que la determinación del caudal ecológico no debe representar un valor o conjunto de valores sino que estos son el pilar para proceder con la implementación de un sistema que nos permita el aprovechamiento del agua en forma continua y controlada, de manera que nos brinde la capacidad de conservar los ecosistemas dentro de su propia dinámica.

RECOMENDACIONES

El caudal ecológico no debe solo formar parte de la normativa actual vigente, debe llevarse a la práctica.

Los tramos de ríos considerados como estratégicos, frágiles o de importancia ecológica y ambiental deben tener un caudal ecológico más alto con el fin de conservar el estado natural de los mismos.

Es necesario que el país invierta en estudios de campo para conocer sobre los efectos y modificaciones de los caudales en los diferentes ecosistemas (diversos) y considerar nuevos estudios con indicadores biológicos que pueden brindar buenos resultados.

Es necesario que se desarrolle una normativa más específica sobre la evaluación de caudales ecológicos. Se debe comenzar por identificar las características hidrológicas más importantes según los diversos tipos de ríos, su estado de conservación y las afectaciones al ecosistema, es decir realizar un inventario del estado actual de los ríos y cuencas hidrográficas para proceder con su recuperación o mantenimiento.

Sin importar si el método de cálculo es fácil o complicado para llevarse a cabo es importante contar con un grupo de profesionales, actores políticos, ciudadanos que realicen la gestión del recurso hídrico pues sin su actuación la puesta en marcha de los proyectos no tienen razón de ser.

Se deben desarrollar acciones en las cuales la intervención y compromisos de varios organismos es fundamental para mejorar las redes de monitoreo hidrológico y meteorológico pues de la calidad de esta información depende la determinación de los caudales que sirven para la gestión sustentable de los recursos naturales y la conservación de los páramos.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Agualimpia, Y., & Castro, C. (2006). Metodologías para la detrmnación de los caudales ecologicos en el manejo de los recursos hídricos. *Recuperado en:* <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/4333/6342> , 13.

Alcázar, J. (2007). *El método del caudal básico para la detreminación de caudales de mantenimiento aplicación a la cuenca del Ebro* . Lleida: Recuperado en: https://www.researchgate.net/publication/46314616_El_Metodo_del_Caudal_Basico_para_la_determinacion_de_Caudales_de_Mantenimiento_Aplicacion_a_la_Cuenca_del_Ebro.

Almeida, M. (2010). *Instructivo de procesamiento de información hidrometeorológica*.

Antisana, F. (2002). *Plan de Manejo de la Reserva Antisana*. Recuperado en: <http://alfresco.ambiente.gob.ec:8096/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/f0389ebf-c004-4229-9182-1a035042952f/antisana.pdf>.

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* . México D. F: Editorial Limusa S.A .

Arthington, A.H., Zalucki, J.M. (1998). *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods*. LWRRDC.

Barnes, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channeles* . . Washington: U.S Geological Survey Water-Supply Papre 1849.

Barros , J., & Troncoso, A. (2010). *Atlas climatológico del Ecuador. Tesis de Pregrado de Ingeniería Civil y Ambiental* . Quito-Ecuador.

Benetti, A., Lanna, E., & Cobalchini, M. (2003). Metodologías para la determinación de vazoes ecológicas em ríos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* , 160.

Bietz, F. B., Martin, J. A., & Englert, J. (1985). *Instream Flow Needs for Fish in Alberta: a Users Guide to Assessment Methods*. Edmonton, Alberta: Alberta Energy and Natural Resources, Fish and Wildlife Division .

Binns, N. A., & Eiserman, F. M. (1979). *Quantification of fluvial trout habitat in Wyoming*. Wyoming: Trans Am. Fish Soc 108.

Bovee, K. D. (1982). *A Guide to Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. *Instr. Flow* . Washington: Paper 12. USDI Fish and Wild. Serv.

Bovee, K. D., & Cochnauer, T. (1977). Development and evaluation of weighted criteria probability of use curves from instream flow assessment. *Instream Flow Information Paper 3 FWS/OBS-77/63. Biological services Programm U.S. Fish and Wildlife Service* .

Bovee, K. D., & Milhous, R. (1978). *Hydraulic simulation in stream flow studies: Theory and Techniques*. *Instream Flow Information paper nº 5*. Colorado: Cooperative Instream Flow Service Group .

Bragg, O., Black, R., Duck, R., & Rowan, J. (2005). Approaching the physical-biological interface in rivers: a review of methods for ecological evaluation of flow regimes. *Progress in Physical Geography*. *Link a la revista DOI: 10.1191/0309133305pp460ra* , 506-531.

Buytaert , W., Cellerl, R., De Blevre, B., Cisneros , F., Wyseure, G., Deckers, J., y otros. (2006). *Human impact on the hydrology of the Andean Páramo*.

Cantera, J. R., Carvajal, Y., & Castro, L. (2009). *Caudal ambiental conceptos, experiencias y desafíos*. Cali, Colombia: Programa Editorial Universidad del Valle.

Castro et al. (2006). *Enfoques Teóricos Para Definir El Caudal Ambiental*. Colombia.

Castro, L. M., & Carvajal, Y. (2009). *Medologias para determinar el caudal ambiental* .

Castro, L. M., Carvajal, Y., & Monsalve, E. (2006). *Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental*. Colombia: Recuperado en: Dialnet-EnfoquesTeoricosParaDefinirElCaudalAmbienta-2265552%20(8).pdf.

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de los canales abiertos* . México.

Claudio, S. M., & Martínez, C. (2013). *Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos, resultados y posibles consecuencias*. Bogotá.

Conservacy, T. N. (2009). Indicadores de alteración hidrológica. *The Nature Conservacy* , 87.

Consuegra, C. (2013). *Síntesis metodoógica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y consecuencias*. Bogotá: Recuerado en: .

D, J. (2007). *Tropical high-altitude streams*. En *Aquatic Ecology: Tropical Stream Ecology*. USA.

Díez, H. J. (2005). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y Competitividad*. Universidad del Valle Colombia. Recuperado en: <http://www.redalyc.org/pdf/2913/291323478002.pdf> .

Díez, J. M. (2000). *Metodologías para la estimación de caudales ecológicos* . España: Universidad de Valladolid, Escuela Superior de Ingenierías Agrarias .

Docampo, L., & García de Bikuña, B. (1995). *The Basque Method for determining instream flows in Northern Spain*. España.

Emck, P. A., Moreira-Muñoz, & Richter, M. (2006). *Botánica económica de los Andes Centrales*.

Fagnoud, E. (1987). *Prefernces d'habitat de la truite fario en riviere*. Tesis doctoral.

Gippet, C. (2001). *Hydrological Analyses for Environmetal Flow Assessment*. In *Proceedings MODSIM 2001, Intenational Congress on Madelling and Simulation, Modelling & Simulation Society of Australia & New Zealand*. Australia & New Zeland: Ghassemi, F and Whetton P (Eds), The Australian National University Canberra. Recuperado en: <http://mssanz.org.au/MODSIM01/Vol%202/Gippel.pdf>.

González, E. J., & Carrillo & C Peñaherrera. (2004). *Características físico y químicas del embalse agua fría (Parque Nacional Macarao, Estado de Miranda, Venezuela)*.

Gordon, N. D., McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (1992). *Stream Hydrology. An introduction for ecologists*. England: Jhon Wiley y SOns.

Grant, G. E., Duval, J. E., Koerper, G. J., & Fogg, J. L. (1992). *A channel cross-section analyzer*.

Guerrero, J. (2011). *Capítulo 4 geomorfología de cuencas p. 11*. Recuperado de: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oguerre/4Geomorfologia.pdf>.

Guevara, E., & Rodríguez, C. (2013). *Caudales ambientales, necesidad de su reconocimiento y lineamientos básicos para su regulación en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.

Guevara, E., & Rodriguez, C. (2013). *Caudales ambientales, necesidades de su reconocimiento y lineamientos básicos para su regulación en Cosra rica*. 942Costa Rica. Recuperado en: ijj.ucr.ac.cr/node/942.

Harrelson, C. C., Rawlins, C. L., & Potyondy, J. P. (1994). *Stream Channel Reference Sites: An illustrated guide to field technique*. Gen. Tech. Rep. RM-245. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.

Hegggenes, J. (1990). *Habitat utilization and preferences in juvenile atlantic salmon (Salmo salar) in streams*.

Hernández, J. M., Ferrer, J., Peris, A., Hernández, A., Martínez, F., & Bargay, M. (2008). *Guía para la determinación del régimen de caudales ecológicos*.

Herrington, R. B., & Durham, D. K. (1967). *A technique for sampling general fish habitat characteristics of stream*. Res. Pap. INT-41 Orgen, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Hutchins, L. (2005). *Massachusetts Stream Flow Standard and Stressed Basins Reclassification*. Department of Conservation and Recreation Massachusetts Water Resources Commission. Recuperado en http://www.mass.gov/envir/mwrc/ppt/streamflow_standards_stress_reclassification.ppt#256,1,Massachusetts Stream Flow Standards and Stressed Basins.

Jacobsen, D. (2004). *Contrasting patterns in local and zonal family richness of stream invertebrates along an Andean altitudinal gradient*.

Jacobsen, D. (2007). *Tropical high-altitude stream*. En *Aquatic Ecology: Tropical Stream Ecology*. Dudgeonm David (Editor). (pp. 219-256). Burlington MA USA: Recuperado en: <http://site.ebrary.com/lib/puce/DOC?id=2030611B&ppg=275>.

Jacobsen, D., & Brodersen, K. P. (2008). *Are altitudinal limits of equatorial stream insects reflected in their respiratory performance?*

Jamett, G., & Rodrigues, A. (2005). *Evaluación del Instrumento Caudal Ecológico, panorama legal e institucional Chile y Brasil*. Recuperado en: <http://www.eclac.cl/samtac/noticias/documentosdetrabajo/1/23391/DrSam00508.pdf>.

Leopold, J. T. (1994). *A view of the river*. London England: Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts.

Leopold, L. B. (1994). *A view of the river*. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts. London, England.

Loar, J. M., & Sale, M. J. (1981). Analysis of Environmental Issues Related to Small-Scale Hydroelectric Development. *Environmental Science Division Publication No. 1829 ONRL/TM 7861*. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy.

Maisincho, L., Cáceres, B., Manciatí, C., Loyo, C., Cuenca, M., Arias, M., y otros. (2007). *Glaciares del Ecuador: Antisana y Carihuayrazo*.

Mayo, M. (2000). *Determinación de Regímenes de caudales ecológicos mínimos*. España: Tesis doctoral. Recuperado de: <http://oa.upm.es/667/1/07200013.pdf>.

Milhous, R. T. (1989). *Hydraulics in Physical Habitat Simulation: A 1989 Review*. Proceedings of the ninth annual AGU front Range Branch Hydrology Days.

Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá Colombia.

Montealegre, J. (2010). *Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Bogotá-Colombia: HIMAT.

Montgomery , D., Balco, G., & Willett, S. (2001). *Climate, tectonics, and the morphology of the Andes*.

Newbury, R. W., & Gaboury, M. N. (1993). *Stream analysis and fish habitat desing*. Canada .

Olivares, P. (2004). *Estimación de caudales ecológicos*. Recuperado en: http://www.aic.cl.pdf/Pablo_Olivares_Cadeldepe.pdf.

Oñate, F. (2010). *Hidrología: apuntes de clases. Universidad Técnica Particular de Loja*. Recuperado en: <http://www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf>.

Orth D. J., Maughan, E. . (1981). *Evaluation of the Montana Method for Recommending Instream Flows in Oklahoma Streams*. Proceedings of the Oklahoma Academy of Science,.

Overton, C. K., Wollrab, S. P., Roberts, B. C., & Radko, M. A. (1997). *(Northern/Intermountain Regions) fish and fish habitat standard inventory procedures handbook* . USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station .

Palau, A. (2003). *Aspectos clave sobre los caudales de mantenimiento en la elaboración del plan hidológico del Ebro: Universitat de Lleida*.

Palau, A. (2003). *Aspectos clave sobre los caudales de mantenimiento en la elaboración del pla hidológico del Ebro*. Consultado en: <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/DirectivaMarco/ParticipacionCiudadana/7apalua-unilleida.pdf>.

Palau, A. (1996). *Los mal llamados caudales ecológicos. Base para una propuesta de cálculo.* . Revista de la Asociación para el estudio y mejora de los salmónidos. .

Platts, W. S. (1974). *Geomorphic and aquatic conditions influencing salmonids and stream classification with application to ecosystem management.* Billings MT: U.S Department of Agriculture, Seam Program. .

Poff, N. L., Allan , M. A., Palmer , D. D., Hart, B. D., Richter, A. H., Arthington, K. H., y otros. (2003). *River flows and water wars: emerging science for environmental decision making.*

Pyrce, R. S. (2004). Hydrological Low Flow Indices and their Uses. *Watershed Science Centre, Peterborough, Ontario .*

Reyes, A., Ulises, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas.* Santiago de Cali.

Richardson, B. A. (1986). *Evaluation of instream flow methodologies for freshwater fish in New South Wales.* Australia: Steam protection: the management of rivers for instream uses. I.C Cambel (Ed) Water Studies Center.

Richter, B. (2009). *Re-thinking enviromental flows: from allocations ans reserves to sustainability boundaries.* River Research and Applications 26 (8). Link a la revista DOI: 10.1002/rra.1320.

Richter, B., Baumgartner, J., Powel, J., & Braun, D. (1996). *A Method for Assessing Hydrologic alteration within Ecosystems.* Conservation Biology 10 (4). Link a la revista DOI: 10.1046/j1523-1739.1996.10041163x.

Richter, B., Baumgartner, J., Wignington, R., & Braun, D. (1997). *How much water does a river need ? .* Freshwater Biology. Link a la revista DOI: 10.1046/j.13652427.1997.00153x.

Ríos, L. (2010). *Incidencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador*. Quito.

Roldán, G. (2003). *Bio indicación de la calidad de agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.

Roldán, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Bogotá-Colombia: Prama Editores Ltda.

Rosero, D. (2005). *Informe del estado de degradación de la cuenca y la disminución de caudales. Fondo para la protección del Agua FONAG*.

Rosgen, D. (1996). *Applied River Methodology*. Colorado USA: Pagosa Spring .

Rosgen, D. (1996). *Applied River Morphology*. Colorado USA: Wildland Hydrology.

Silveira, L. A., & Silveira, L. G. (2003). Hidrología Aplicada a gestao de pequenas bacias hidrologicas. *Associacion Brasileira de recursos Hídricos* .

Simons, T. D., Lyons, J., & Kanehl, P. D. (1993). *Guides for evaluating fish habitat in Wisconsin stream*.

Simonson, T. D., Lyons, J., & Kanehl, P. D. (1993). *Guidelines for evaluating fish habitat in Wisconsin stream*. . U.S: Gen. Tech. Rep NC-164. St Paul, MN; U.S Department of Agriculture, Forest Service; North Central Forest Experimental Station.

Stalnaker, C. B., & Arnette, J. L. (1976). *Methodologies and determination of stream resource flow requirements and assessment* . U.S Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-79/36. Fort Collins, CO.

Stalnaker, C., Lamb, B. L., Henriksen, J., Bovee, K., & Bartholow, J. (1994). *The Instream Flow Incremental Methodology. A Primer for IFIM*. National Ecology Research Center. National Biological Survey.

Strickler, A. (1983). *Some contributions to the problems of the velocity formula and roughness factors for rivers, canal and close conduits*. Switzerland: Mitteilungen des eidgenossischen Amies fur Wasserwirtschaft. Bern .

Tennant, D.L. (1976). *Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources*. Fisheries 1(4): 6-10.

Tharme R. E . (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and aplication of environmental flow methologies for rivers. *River Research Aplications* .

Thoms , M. C., & Sheldon, F. (2002). *An ecosystem approach for determining environmental water allocations in Australian dryland river systems: the role af geomorphology*.

Unesco., I. d. (1981). *Métodos de cálculo del balace hídrico: guía internacional de investigación y métodos*. Madrid, España.

Vilchez, G. (2010). *Servicio de Consultoría para la Sistematización y Seguimiento de la Apliación de Metodologías de Determinación del Caudal Ecológico en Cuencas Hidrográficas en el Marco de las Acciones de Serguimiento e Intervención*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.

Villacis, O., & Andrade, L. (1985). *Guía de hidrologia aplicada para minicentrales hidroeléctrica Quito*.

Villamarín, C., Prat, N., & Rieradevall, M. (2014). *Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú*. Recuperado en: <http://www.scielo.cl/pdf/lajar/v42n5/art12.pdf>.

Young, K. (2011). *Introduction to Andean geographie*. In: S.K Herzog, R. Martinez, P.M. Jorgensen & H. Tiessen (eds). *Climate change and biodiversity in the tropical Andes*.

Zamora, C., & Alba, J. (1996). *Bioassessment of organically polluted Spanish rivers, using a Biotic Index and Multivariate Methods*. Journal of the North American Benthological Society.

ANEXOS

ANEXO N° 1

CAUDALES MEDIOS DIARIOS RIOS JATUNHUAYCU

| JATUNHUAYCU CAUDALES MEDIOS DIARIOS | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2004 | | | | | | | | | | | | |
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0.305 | 0.257 | 0.144 | 0.288 | 0.246 | 0.307 | 0.165 | 0.266 | 0.242 | 0.197 | 0.260 | 0.226 |
| 2 | 0.298 | 0.254 | 0.210 | 0.180 | 0.240 | 0.300 | 0.165 | 0.210 | 0.207 | 0.223 | 0.274 | 0.248 |
| 3 | 0.295 | 0.245 | 0.193 | 0.228 | 0.238 | 0.297 | 0.178 | 0.196 | 0.198 | 0.207 | 0.255 | 0.254 |
| 4 | 0.292 | 0.194 | 0.155 | 0.269 | 0.236 | 0.294 | 0.191 | 0.229 | 0.190 | 0.211 | 0.269 | 0.249 |
| 5 | 0.299 | 0.246 | 0.150 | 0.289 | 0.241 | 0.301 | 0.170 | 0.218 | 0.190 | 0.202 | 0.290 | 0.248 |
| 6 | 0.256 | 0.196 | 0.163 | 0.182 | 0.207 | 0.258 | 0.221 | 0.195 | 0.184 | 0.214 | 0.336 | 0.234 |
| 7 | 0.298 | 0.195 | 0.201 | 0.267 | 0.240 | 0.300 | 0.167 | 0.198 | 0.187 | 0.196 | 0.326 | 0.245 |
| 8 | 0.298 | 0.189 | 0.217 | 0.205 | 0.240 | 0.300 | 0.183 | 0.195 | 0.208 | 0.176 | 0.419 | 0.213 |
| 9 | 0.291 | 0.220 | 0.164 | 0.216 | 0.235 | 0.293 | 0.178 | 0.185 | 0.203 | 0.170 | 0.420 | 0.223 |
| 10 | 0.288 | 0.272 | 0.134 | 0.229 | 0.232 | 0.290 | 0.178 | 0.170 | 0.217 | 0.184 | 0.369 | 0.203 |
| 11 | 0.277 | 0.192 | 0.226 | 0.201 | 0.224 | 0.212 | 0.162 | 0.168 | 0.218 | 0.159 | 0.314 | 0.245 |
| 12 | 0.240 | 0.191 | 0.166 | 0.182 | 0.193 | 0.241 | 0.159 | 0.191 | 0.198 | 0.189 | 0.321 | 0.021 |
| 13 | 0.277 | 0.185 | 0.167 | 0.180 | 0.223 | 0.279 | 0.156 | 0.214 | 0.173 | 0.149 | 0.453 | 0.220 |
| 14 | 0.289 | 0.226 | 0.181 | 0.236 | 0.233 | 0.233 | 0.153 | 0.197 | 0.176 | 0.182 | 0.377 | 0.255 |
| 15 | 0.268 | 0.205 | 0.151 | 0.170 | 0.216 | 0.216 | 0.174 | 0.188 | 0.214 | 0.213 | 0.279 | 0.247 |
| 16 | 0.400 | 0.241 | 0.204 | 0.168 | 0.226 | 0.188 | 0.195 | 0.189 | 0.195 | 0.211 | 0.226 | 0.201 |
| 17 | 0.310 | 0.208 | 0.197 | 0.170 | 0.214 | 0.206 | 0.229 | 0.195 | 0.164 | 0.202 | 0.215 | 0.191 |
| 18 | 0.223 | 0.191 | 0.186 | 0.164 | 0.207 | 0.226 | 0.221 | 0.204 | 0.149 | 0.209 | 0.251 | 0.184 |
| 19 | 0.274 | 0.180 | 0.154 | 0.206 | 0.207 | 0.235 | 0.221 | 0.192 | 0.154 | 0.204 | 0.221 | 0.184 |
| 20 | 0.281 | 0.191 | 0.163 | 0.216 | 0.230 | 0.287 | 0.246 | 0.332 | 0.155 | 0.188 | 0.236 | 0.205 |
| 21 | 0.239 | 0.169 | 0.165 | 0.205 | 0.193 | 0.241 | 0.207 | 0.270 | 0.171 | 0.179 | 0.268 | 0.163 |
| 22 | 0.242 | 0.171 | 0.159 | 0.164 | 0.210 | 0.262 | 0.225 | 0.233 | 0.173 | 0.165 | 0.294 | 0.196 |
| 23 | 0.352 | 0.242 | 0.183 | 0.181 | 0.227 | 0.195 | 0.243 | 0.223 | 0.168 | 0.170 | 0.313 | 0.196 |
| 24 | 0.413 | 0.197 | 0.189 | 0.182 | 0.219 | 0.179 | 0.234 | 0.245 | 0.167 | 0.158 | 0.247 | 0.166 |
| 25 | 0.359 | 0.168 | 0.158 | 0.173 | 0.208 | 0.183 | 0.197 | 0.268 | 0.189 | 0.159 | 0.243 | 0.166 |
| 26 | 0.341 | 0.215 | 0.198 | 0.183 | 0.220 | 0.200 | 0.185 | 0.228 | 0.207 | 0.155 | 0.265 | 0.192 |
| 27 | 0.341 | 0.198 | 0.138 | 0.197 | 0.215 | 0.202 | 0.327 | 0.297 | 0.219 | 0.152 | 0.313 | 0.218 |
| 28 | 0.409 | 0.168 | 0.137 | 0.187 | 0.224 | 0.214 | 0.259 | 0.266 | 0.196 | 0.159 | 0.262 | 0.215 |
| 29 | 0.338 | 0.228 | 0.147 | 0.182 | 0.218 | 0.187 | 0.217 | 0.280 | 0.199 | 0.163 | 0.260 | 0.177 |
| 30 | 0.350 | | 0.183 | 0.191 | 0.230 | 0.161 | 0.355 | 0.277 | 0.217 | 0.166 | 0.274 | 0.114 |
| 31 | 0.342 | | 0.212 | | 0.284 | | 0.377 | 0.258 | | 0.194 | | 0.254 |
| MED | 0.306 | 0.208 | 0.174 | 0.203 | 0.225 | 0.243 | 0.211 | 0.225 | 0.191 | 0.184 | 0.295 | 0.205 |
| MÍN | 0.223 | 0.168 | 0.134 | 0.164 | 0.193 | 0.161 | 0.153 | 0.168 | 0.149 | 0.149 | 0.215 | 0.021 |
| MAX | 0.413 | 0.272 | 0.226 | 0.289 | 0.284 | 0.307 | 0.377 | 0.332 | 0.242 | 0.223 | 0.453 | 0.255 |

| JATUNHUAYCU CAUDALES MEDIOS DIARIOS | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2005 | | | | | | | | | | | | |
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0.185 | 0.155 | 0.160 | 0.095 | 0.231 | 0.363 | 0.244 | 0.215 | 0.184 | 0.164 | 0.170 | 0.128 |
| 2 | 0.201 | 0.168 | 0.173 | 0.108 | 0.235 | 0.408 | 0.238 | 0.218 | 0.200 | 0.177 | 0.219 | 0.131 |
| 3 | 0.188 | 0.157 | 0.162 | 0.098 | 0.223 | 0.332 | 0.203 | 0.228 | 0.186 | 0.176 | 0.217 | 0.140 |
| 4 | 0.194 | 0.162 | 0.167 | 0.128 | 0.190 | 0.317 | 0.197 | 0.232 | 0.193 | 0.192 | 0.239 | 0.147 |
| 5 | 0.195 | 0.163 | 0.168 | 0.114 | 0.200 | 0.360 | 0.188 | 0.223 | 0.169 | 0.216 | 0.236 | 0.150 |
| 6 | 0.206 | 0.173 | 0.178 | 0.164 | 0.209 | 0.358 | 0.220 | 0.232 | 0.184 | 0.173 | 0.242 | 0.145 |
| 7 | 0.200 | 0.167 | 0.173 | 0.184 | 0.204 | 0.291 | 0.251 | 0.216 | 0.187 | 0.161 | 0.224 | 0.135 |
| 8 | 0.208 | 0.174 | 0.179 | 0.229 | 0.206 | 0.271 | 0.217 | 0.218 | 0.192 | 0.198 | 0.205 | 0.131 |
| 9 | 0.230 | 0.193 | 0.199 | 0.315 | 0.221 | 0.270 | 0.200 | 0.231 | 0.190 | 0.195 | 0.233 | 0.140 |
| 10 | 0.227 | 0.190 | 0.196 | 0.253 | 0.296 | 0.296 | 0.189 | 0.204 | 0.183 | 0.201 | 0.232 | 0.159 |
| 11 | 0.218 | 0.182 | 0.188 | 0.203 | 0.281 | 0.293 | 0.185 | 0.207 | 0.202 | 0.182 | 0.229 | 0.191 |
| 12 | 0.221 | 0.185 | 0.191 | 0.151 | 0.450 | 0.274 | 0.182 | 0.211 | 0.195 | 0.167 | 0.254 | 0.161 |
| 13 | 0.225 | 0.188 | 0.194 | 0.266 | 0.297 | 0.266 | 0.178 | 0.216 | 0.202 | 0.161 | 0.229 | 0.160 |
| 14 | 0.235 | 0.196 | 0.203 | 0.249 | 0.321 | 0.260 | 0.189 | 0.232 | 0.218 | 0.152 | 0.231 | 0.232 |
| 15 | 0.203 | 0.170 | 0.176 | 0.174 | 0.233 | 0.247 | 0.184 | 0.234 | 0.218 | 0.161 | 0.211 | 0.203 |
| 16 | 0.197 | 0.165 | 0.170 | 0.176 | 0.227 | 0.215 | 0.182 | 0.220 | 0.206 | 0.146 | 0.260 | 0.168 |
| 17 | 0.193 | 0.161 | 0.166 | 0.172 | 0.211 | 0.210 | 0.211 | 0.213 | 0.215 | 0.160 | 0.210 | 0.172 |
| 18 | 0.197 | 0.165 | 0.170 | 0.190 | 0.204 | 0.215 | 0.211 | 0.211 | 0.217 | 0.209 | 0.168 | 0.174 |
| 19 | 0.186 | 0.155 | 0.160 | 0.159 | 0.198 | 0.203 | 0.243 | 0.193 | 0.218 | 0.183 | 0.175 | 0.155 |
| 20 | 0.209 | 0.175 | 0.181 | 0.151 | 0.178 | 0.229 | 0.544 | 0.209 | 0.198 | 0.202 | 0.209 | 0.163 |
| 21 | 0.181 | 0.151 | 0.156 | 0.152 | 0.179 | 0.197 | 0.269 | 0.216 | 0.187 | 0.180 | 0.166 | 0.154 |
| 22 | 0.171 | 0.143 | 0.148 | 0.124 | 0.233 | 0.187 | 0.225 | 0.214 | 0.167 | 0.155 | 0.154 | 0.156 |
| 23 | 0.172 | 0.144 | 0.148 | 0.150 | 0.177 | 0.187 | 0.274 | 0.230 | 0.143 | 0.149 | 0.159 | 0.151 |
| 24 | 0.172 | 0.144 | 0.149 | 0.142 | 0.172 | 0.188 | 0.280 | 0.205 | 0.170 | 0.139 | 0.174 | 0.166 |
| 25 | 0.178 | 0.149 | 0.154 | 0.132 | 0.181 | 0.194 | 0.278 | 0.215 | 0.186 | 0.149 | 0.191 | 0.172 |
| 26 | 0.209 | 0.175 | 0.180 | 0.195 | 0.202 | 0.228 | 0.275 | 0.252 | 0.185 | 0.182 | 0.193 | 0.223 |
| 27 | 0.211 | 0.176 | 0.182 | 0.155 | 0.305 | 0.144 | 0.331 | 0.254 | 0.148 | 0.171 | 0.193 | 0.302 |
| 28 | 0.178 | 0.149 | 0.154 | 0.126 | 0.223 | 0.124 | 0.296 | 0.215 | 0.145 | 0.177 | 0.224 | 0.183 |
| 29 | 0.171 | | 0.147 | 0.133 | 0.220 | 0.288 | 0.271 | 0.206 | 0.149 | 0.186 | 0.176 | 0.179 |
| 30 | 0.192 | | 0.165 | 0.121 | 0.207 | 0.325 | 0.289 | 0.231 | 0.142 | 0.174 | 0.157 | 0.201 |
| 31 | 0.156 | | 0.135 | | 0.153 | | 0.289 | 0.188 | | 0.157 | | 0.164 |
| MED | 0.197 | 0.167 | 0.170 | 0.167 | 0.228 | 0.258 | 0.243 | 0.219 | 0.186 | 0.174 | 0.206 | 0.169 |
| MÍN | 0.156 | 0.143 | 0.135 | 0.095 | 0.153 | 0.124 | 0.178 | 0.188 | 0.142 | 0.139 | 0.154 | 0.128 |
| MAX | 0.235 | 0.196 | 0.203 | 0.315 | 0.450 | 0.408 | 0.544 | 0.254 | 0.218 | 0.216 | 0.260 | 0.302 |

| JATUNHUAYCU CAUDALES MEDIOS DIARIOS | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2006 | | | | | | | | | | | | |
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0.163 | 0.166 | 0.175 | 0.116 | 0.202 | 0.456 | 0.223 | 0.236 | 0.207 | 0.186 | 0.241 | 0.338 |
| 2 | 0.170 | 0.173 | 0.242 | 0.124 | 0.211 | 0.411 | 0.226 | 0.248 | 0.207 | 0.192 | 0.245 | 0.345 |
| 3 | 0.174 | 0.178 | 0.217 | 0.134 | 0.216 | 0.360 | 0.349 | 0.218 | 0.188 | 0.195 | 0.261 | 0.345 |
| 4 | 0.161 | 0.164 | 0.223 | 0.152 | 0.199 | 0.324 | 0.259 | 0.222 | 0.175 | 0.190 | 0.268 | 0.264 |
| 5 | 0.164 | 0.167 | 0.184 | 0.169 | 0.203 | 0.335 | 0.219 | 0.256 | 0.169 | 0.197 | 0.249 | 0.347 |
| 6 | 0.188 | 0.192 | 0.231 | 0.152 | 0.233 | 0.632 | 0.217 | 0.244 | 0.173 | 0.223 | 0.268 | 0.413 |
| 7 | 0.180 | 0.184 | 0.209 | 0.166 | 0.207 | 0.384 | 0.210 | 0.276 | 0.176 | 0.217 | 0.311 | 0.430 |
| 8 | 0.195 | 0.199 | 0.210 | 0.141 | 0.449 | 0.352 | 0.199 | 0.276 | 0.181 | 0.239 | 0.404 | 0.299 |
| 9 | 0.179 | 0.183 | 0.195 | 0.142 | 0.332 | 0.347 | 0.203 | 0.277 | 0.187 | 0.211 | 0.383 | 0.276 |
| 10 | 0.167 | 0.170 | 0.191 | 0.130 | 0.243 | 0.322 | 0.194 | 0.282 | 0.187 | 0.184 | 0.388 | 0.270 |
| 11 | 0.164 | 0.167 | 0.208 | 0.130 | 0.235 | 0.301 | 0.201 | 0.287 | 0.181 | 0.180 | 0.359 | 0.256 |
| 12 | 0.166 | 0.169 | 0.206 | 0.167 | 0.229 | 0.416 | 0.203 | 0.269 | 0.196 | 0.183 | 0.296 | 0.220 |
| 13 | 0.159 | 0.162 | 0.197 | 0.151 | 0.219 | 0.464 | 0.205 | 0.271 | 0.212 | 0.175 | 0.194 | 0.223 |
| 14 | 0.162 | 0.165 | 0.188 | 0.147 | 0.207 | 0.372 | 0.204 | 0.277 | 0.199 | 0.179 | 0.318 | 0.241 |
| 15 | 0.176 | 0.180 | 0.208 | 0.147 | 0.215 | 0.339 | 0.208 | 0.255 | 0.196 | 0.194 | 0.542 | 0.214 |
| 16 | 0.161 | 0.164 | 0.194 | 0.148 | 0.203 | 0.349 | 0.204 | 0.246 | 0.203 | 0.177 | 0.362 | 0.214 |
| 17 | 0.160 | 0.163 | 0.177 | 0.137 | 0.213 | 0.463 | 0.199 | 0.251 | 0.214 | 0.176 | 0.277 | 0.222 |
| 18 | 0.160 | 0.164 | 0.176 | 0.144 | 0.204 | 0.514 | 0.198 | 0.264 | 0.208 | 0.177 | 0.219 | 0.255 |
| 19 | 0.155 | 0.158 | 0.205 | 0.143 | 0.192 | 0.396 | 0.209 | 0.267 | 0.197 | 0.171 | 0.199 | 0.263 |
| 20 | 0.164 | 0.167 | 0.196 | 0.140 | 0.203 | 0.449 | 0.208 | 0.289 | 0.197 | 0.181 | 0.220 | 0.311 |
| 21 | 0.165 | 0.169 | 0.191 | 0.154 | 0.197 | 0.547 | 0.220 | 0.261 | 0.190 | 0.182 | 0.237 | 0.254 |
| 22 | 0.170 | 0.173 | 0.205 | 0.154 | 0.184 | 0.570 | 0.217 | 0.273 | 0.235 | 0.187 | 0.223 | 0.261 |
| 23 | 0.163 | 0.166 | 0.213 | 0.153 | 0.189 | 0.484 | 0.196 | 0.281 | 0.206 | 0.180 | 0.233 | 0.250 |
| 24 | 0.173 | 0.177 | 0.205 | 0.163 | 0.186 | 0.389 | 0.188 | 0.272 | 0.201 | 0.199 | 0.245 | 0.455 |
| 25 | 0.177 | 0.181 | 0.263 | 0.167 | 0.204 | 0.377 | 0.213 | 0.255 | 0.219 | 0.205 | 0.243 | 0.390 |
| 26 | 0.169 | 0.172 | 0.203 | 0.159 | 0.194 | 0.368 | 0.213 | 0.238 | 0.251 | 0.195 | 0.212 | 0.379 |
| 27 | 0.157 | 0.160 | 0.208 | 0.148 | 0.217 | 0.383 | 0.202 | 0.244 | 0.208 | 0.188 | 0.201 | 0.250 |
| 28 | 0.150 | 0.125 | 0.202 | 0.142 | 0.203 | 0.385 | 0.192 | 0.233 | 0.206 | 0.185 | 0.215 | 0.242 |
| 29 | 0.155 | | 0.210 | 0.146 | 0.211 | 0.360 | 0.189 | 0.230 | 0.208 | 0.208 | 0.200 | 0.244 |
| 30 | 0.153 | | 0.186 | 0.144 | 0.212 | 0.362 | 0.171 | 0.223 | 0.222 | 0.170 | 0.235 | 0.275 |
| 31 | 0.149 | | 0.175 | | 0.206 | | 0.170 | 0.248 | | 0.164 | | 0.274 |
| MED | 0.166 | 0.170 | 0.203 | 0.147 | 0.220 | 0.407 | 0.210 | 0.257 | 0.200 | 0.190 | 0.275 | 0.291 |
| MÍN | 0.149 | 0.125 | 0.175 | 0.116 | 0.184 | 0.301 | 0.170 | 0.218 | 0.169 | 0.164 | 0.194 | 0.214 |
| MAX | 0.195 | 0.199 | 0.263 | 0.169 | 0.449 | 0.632 | 0.349 | 0.289 | 0.251 | 0.239 | 0.542 | 0.455 |

| JATUNHUAYCU CAUDALES MEDIOS DIARIOS | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2007 | | | | | | | | | | | | |
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0.227 | 0.257 | 0.225 | 0.225 | 0.191 | 0.152 | 0.394 | 0.139 | 0.357 | 0.192 | 0.331 | 0.200 |
| 2 | 0.239 | 0.277 | 0.233 | 0.230 | 0.194 | 0.135 | 0.350 | 0.137 | 0.302 | 0.188 | 0.294 | 0.182 |
| 3 | 0.230 | 0.273 | 0.210 | 0.259 | 0.195 | 0.135 | 0.338 | 0.144 | 0.289 | 0.189 | 0.267 | 0.185 |
| 4 | 0.220 | 0.274 | 0.185 | 0.276 | 0.218 | 0.140 | 0.330 | 0.155 | 0.276 | 0.190 | 0.250 | 0.226 |
| 5 | 0.240 | 0.271 | 0.209 | 0.234 | 0.188 | 0.129 | 0.312 | 0.170 | 0.287 | 0.188 | 0.217 | 0.217 |
| 6 | 0.224 | 0.274 | 0.229 | 0.224 | 0.169 | 0.134 | 0.291 | 0.168 | 0.264 | 0.184 | 0.197 | 0.203 |
| 7 | 0.234 | 0.282 | 0.201 | 0.230 | 0.194 | 0.199 | 0.289 | 0.170 | 0.257 | 0.182 | 0.191 | 0.199 |
| 8 | 0.237 | 0.272 | 0.189 | 0.259 | 0.199 | 0.172 | 0.321 | 0.178 | 0.252 | 0.195 | 0.190 | 0.190 |
| 9 | 0.218 | 0.211 | 0.217 | 0.243 | 0.233 | 0.175 | 0.292 | 0.168 | 0.257 | 0.194 | 0.221 | 0.215 |
| 10 | 0.202 | 0.197 | 0.226 | 0.232 | 0.210 | 0.147 | 0.285 | 0.161 | 0.250 | 0.185 | 0.269 | 0.222 |
| 11 | 0.228 | 0.211 | 0.187 | 0.234 | 0.182 | 0.141 | 0.287 | 0.198 | 0.244 | 0.176 | 0.233 | 0.215 |
| 12 | 0.228 | 0.206 | 0.197 | 0.219 | 0.189 | 0.170 | 0.285 | 0.309 | 0.254 | 0.179 | 0.190 | 0.196 |
| 13 | 0.221 | 0.234 | 0.187 | 0.205 | 0.200 | 0.319 | 0.283 | 0.217 | 0.242 | 0.194 | 0.197 | 0.208 |
| 14 | 0.208 | 0.222 | 0.192 | 0.236 | 0.193 | 0.599 | 0.275 | 0.198 | 0.234 | 0.191 | 0.204 | 0.215 |
| 15 | 0.219 | 0.184 | 0.192 | 0.242 | 0.196 | 0.601 | 0.289 | 0.184 | 0.239 | 0.182 | 0.202 | 0.243 |
| 16 | 0.264 | 0.195 | 0.181 | 0.233 | 0.170 | 0.328 | 0.278 | 0.282 | 0.277 | 0.221 | 0.207 | 0.202 |
| 17 | 0.187 | 0.197 | 0.211 | 0.269 | 0.169 | 0.271 | 0.276 | 0.320 | 0.191 | 0.223 | 0.299 | 0.189 |
| 18 | 0.206 | 0.207 | 0.201 | 0.228 | 0.181 | 0.241 | 0.267 | 0.288 | 0.242 | 0.217 | 0.251 | 0.253 |
| 19 | 0.168 | 0.186 | 0.187 | 0.236 | 0.227 | 0.222 | 0.261 | 0.217 | 0.242 | 0.232 | 0.230 | 0.231 |
| 20 | 0.200 | 0.174 | 0.227 | 0.280 | 0.193 | 0.278 | 0.283 | 0.204 | 0.229 | 0.264 | 0.223 | 0.324 |
| 21 | 0.197 | 0.163 | 0.213 | 0.262 | 0.182 | 0.515 | 0.261 | 0.226 | 0.231 | 0.238 | 0.224 | 0.264 |
| 22 | 0.209 | 0.203 | 0.196 | 0.236 | 0.195 | 0.386 | 0.255 | 0.229 | 0.234 | 0.234 | 0.242 | 0.221 |
| 23 | 0.243 | 0.242 | 0.209 | 0.320 | 0.163 | 0.316 | 0.250 | 0.201 | 0.243 | 0.219 | 0.230 | 0.256 |
| 24 | 0.163 | 0.226 | 0.231 | 0.260 | 0.163 | 0.298 | 0.249 | 0.198 | 0.238 | 0.206 | 0.219 | 0.246 |
| 25 | 0.168 | 0.225 | 0.242 | 0.324 | 0.171 | 0.412 | 0.247 | 0.198 | 0.252 | 0.208 | 0.216 | 0.248 |
| 26 | 0.198 | 0.221 | 0.239 | 0.272 | 0.150 | 0.311 | 0.241 | 0.187 | 0.226 | 0.208 | 0.216 | 0.241 |
| 27 | 0.238 | 0.228 | 0.218 | 0.257 | 0.160 | 0.350 | 0.335 | 0.177 | 0.241 | 0.222 | 0.234 | 0.221 |
| 28 | 0.257 | 0.246 | 0.211 | 0.218 | 0.174 | 0.259 | 0.256 | 0.188 | 0.245 | 0.253 | 0.223 | 0.212 |
| 29 | 0.248 | | 0.201 | 0.225 | 0.169 | 0.228 | 0.240 | 0.181 | 0.244 | 0.203 | 0.210 | 0.233 |
| 30 | 0.201 | | 0.207 | 0.240 | 0.225 | 0.216 | 0.241 | 0.193 | 0.250 | 0.182 | 0.190 | 0.233 |
| 31 | 0.144 | | 0.218 | | 0.213 | | 0.242 | 0.248 | | 0.154 | | 0.222 |
| MED | 0.215 | 0.227 | 0.209 | 0.247 | 0.189 | 0.266 | 0.284 | 0.201 | 0.253 | 0.203 | 0.229 | 0.223 |
| MÍN | 0.144 | 0.163 | 0.181 | 0.205 | 0.150 | 0.129 | 0.240 | 0.137 | 0.191 | 0.154 | 0.190 | 0.182 |
| MAX | 0.264 | 0.282 | 0.242 | 0.324 | 0.233 | 0.601 | 0.394 | 0.320 | 0.357 | 0.264 | 0.331 | 0.324 |

| JATUNHUAYCU CAUDALES MEDIOS DIARIOS | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2008 | | | | | | | | | | | | |
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0.205 | 0.231 | 0.192 | 0.201 | 0.267 | 0.372 | 0.340 | 0.268 | 0.342 | 0.251 | 0.330 | 0.268 |
| 2 | 0.190 | 0.222 | 0.264 | 0.185 | 0.293 | 0.399 | 0.358 | 0.257 | 0.301 | 0.209 | 0.331 | 0.327 |
| 3 | 0.172 | 0.212 | 0.223 | 0.184 | 0.284 | 0.377 | 0.395 | 0.256 | 0.270 | 0.197 | 0.491 | 0.255 |
| 4 | 0.209 | 0.253 | 0.189 | 0.176 | 0.305 | 0.316 | 0.412 | 0.271 | 0.265 | 0.198 | 0.325 | 0.264 |
| 5 | 0.209 | 0.253 | 0.196 | 0.173 | 0.278 | 0.286 | 0.330 | 0.251 | 0.264 | 0.207 | 0.335 | 0.285 |
| 6 | 0.183 | 0.246 | 0.197 | 0.175 | 0.285 | 0.274 | 0.302 | 0.240 | 0.258 | 0.249 | 0.285 | 0.384 |
| 7 | 0.203 | 0.254 | 0.177 | 0.206 | 0.295 | 0.396 | 0.289 | 0.244 | 0.260 | 0.418 | 0.276 | 0.291 |
| 8 | 0.189 | 0.251 | 0.177 | 0.204 | 0.292 | 0.364 | 0.442 | 0.244 | 0.322 | 0.334 | 0.260 | 0.285 |
| 9 | 0.174 | 0.229 | 0.273 | 0.187 | 0.286 | 0.330 | 0.454 | 0.242 | 0.294 | 0.255 | 0.250 | 0.283 |
| 10 | 0.153 | 0.216 | 0.243 | 0.208 | 0.278 | 0.315 | 0.654 | 0.308 | 0.266 | 0.252 | 0.246 | 0.293 |
| 11 | 0.150 | 0.223 | 0.199 | 0.196 | 0.273 | 0.296 | 0.480 | 0.333 | 0.246 | 0.246 | 0.251 | 0.290 |
| 12 | 0.150 | 0.218 | 0.216 | 0.255 | 0.284 | 0.280 | 0.426 | 0.258 | 0.232 | 0.274 | 0.249 | 0.290 |
| 13 | 0.162 | 0.218 | 0.232 | 0.254 | 0.284 | 0.278 | 0.386 | 0.248 | 0.233 | 0.240 | 0.264 | 0.311 |
| 14 | 0.166 | 0.219 | 0.244 | 0.189 | 0.316 | 0.317 | 0.362 | 0.253 | 0.254 | 0.283 | 0.257 | 0.260 |
| 15 | 0.167 | 0.207 | 0.208 | 0.272 | 0.262 | 0.311 | 0.393 | 0.306 | 0.325 | 0.346 | 0.237 | 0.283 |
| 16 | 0.166 | 0.203 | 0.204 | 0.314 | 0.336 | 0.585 | 0.451 | 0.295 | 0.358 | 0.393 | 0.245 | 0.307 |
| 17 | 0.187 | 0.441 | 0.198 | 0.313 | 0.416 | 0.523 | 0.372 | 0.239 | 0.327 | 0.296 | 0.273 | 0.279 |
| 18 | 0.204 | 0.302 | 0.192 | 0.289 | 0.341 | 0.341 | 0.352 | 0.347 | 0.257 | 0.270 | 0.323 | 0.312 |
| 19 | 0.209 | 0.385 | 0.181 | 0.335 | 0.728 | 0.324 | 0.355 | 0.262 | 0.226 | 0.266 | 0.579 | 0.273 |
| 20 | 0.208 | 0.322 | 0.181 | 0.298 | 0.514 | 0.554 | 0.357 | 0.279 | 0.216 | 0.266 | 0.257 | 0.250 |
| 21 | 0.217 | 0.304 | 0.179 | 0.275 | 0.372 | 0.353 | 0.387 | 0.320 | 0.216 | 0.275 | 0.234 | 0.259 |
| 22 | 0.218 | 0.371 | 0.184 | 0.321 | 0.461 | 0.370 | 0.356 | 0.290 | 0.627 | 0.256 | 0.241 | 0.251 |
| 23 | 0.206 | 0.274 | 0.181 | 0.271 | 0.359 | 0.313 | 0.343 | 0.344 | 0.296 | 0.238 | 0.252 | 0.246 |
| 24 | 0.196 | 0.246 | 0.179 | 0.254 | 0.313 | 0.384 | 0.336 | 0.285 | 0.233 | 0.231 | 0.230 | 0.239 |
| 25 | 0.183 | 0.229 | 0.172 | 0.247 | 0.327 | 0.346 | 0.336 | 0.264 | 0.220 | 0.228 | 0.239 | 0.248 |
| 26 | 0.179 | 0.229 | 0.175 | 0.264 | 0.354 | 0.295 | 0.413 | 0.408 | 0.210 | 0.228 | 0.237 | 0.265 |
| 27 | 0.174 | 0.247 | 0.186 | 0.230 | 0.436 | 0.281 | 0.360 | 0.281 | 0.216 | 0.278 | 0.214 | 0.273 |
| 28 | 0.219 | 0.229 | 0.175 | 0.240 | 0.418 | 0.296 | 0.349 | 0.249 | 0.216 | 0.365 | 0.225 | 0.298 |
| 29 | 0.229 | 0.220 | 0.170 | 0.228 | 0.348 | 0.348 | 0.340 | 0.268 | 0.215 | 0.592 | 0.238 | 0.301 |
| 30 | 0.197 | | 0.182 | 0.225 | 0.336 | 0.396 | 0.313 | 0.248 | 0.435 | 0.278 | 0.227 | 0.259 |
| 31 | 0.217 | | 0.264 | | 0.293 | | 0.305 | 0.322 | | 0.260 | | 0.251 |
| MED | 0.190 | 0.257 | 0.201 | 0.239 | 0.343 | 0.354 | 0.379 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 |
| MÍN | 0.150 | 0.203 | 0.170 | 0.173 | 0.262 | 0.274 | 0.289 | 0.239 | 0.210 | 0.197 | 0.214 | 0.239 |
| MAX | 0.229 | 0.441 | 0.273 | 0.335 | 0.728 | 0.585 | 0.654 | 0.408 | 0.627 | 0.592 | 0.579 | 0.384 |

| JATUNHUAYCU CAUDALES MEDIOS DIARIOS | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2009 | | | | | | | | | | | | |
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0.211 | 0.202 | 0.175 | 0.133 | 0.240 | 0.245 | 0.241 | 0.229 | 0.209 | 0.232 | 0.224 | 0.223 |
| 2 | 0.227 | 0.221 | 0.203 | 0.128 | 0.256 | 0.247 | 0.327 | 0.222 | 0.212 | 0.225 | 0.218 | 0.255 |
| 3 | 0.218 | 0.227 | 0.204 | 0.138 | 0.254 | 0.253 | 0.482 | 0.237 | 0.213 | 0.218 | 0.252 | 0.251 |
| 4 | 0.221 | 0.235 | 0.205 | 0.136 | 0.260 | 0.260 | 0.307 | 0.249 | 0.209 | 0.220 | 0.244 | 0.241 |
| 5 | 0.209 | 0.224 | 0.210 | 0.138 | 0.233 | 0.256 | 0.274 | 0.245 | 0.204 | 0.223 | 0.240 | 0.235 |
| 6 | 0.213 | 0.220 | 0.217 | 0.142 | 0.263 | 0.433 | 0.247 | 0.253 | 0.211 | 0.237 | 0.251 | 0.221 |
| 7 | 0.204 | 0.221 | 0.202 | 0.139 | 0.260 | 0.423 | 0.264 | 0.249 | 0.216 | 0.230 | 0.266 | 0.214 |
| 8 | 0.206 | 0.226 | 0.212 | 0.152 | 0.232 | 0.354 | 0.259 | 0.239 | 0.223 | 0.225 | 0.253 | 0.208 |
| 9 | 0.197 | 0.214 | 0.210 | 0.183 | 0.221 | 0.287 | 0.299 | 0.238 | 0.224 | 0.223 | 0.255 | 0.220 |
| 10 | 0.199 | 0.202 | 0.210 | 0.159 | 0.222 | 0.358 | 0.323 | 0.241 | 0.221 | 0.227 | 0.257 | 0.221 |
| 11 | 0.204 | 0.195 | 0.194 | 0.193 | 0.229 | 0.487 | 0.252 | 0.242 | 0.219 | 0.209 | 0.251 | 0.209 |
| 12 | 0.213 | 0.191 | 0.170 | 0.287 | 0.239 | 0.538 | 0.229 | 0.240 | 0.221 | 0.193 | 0.248 | 0.228 |
| 13 | 0.222 | 0.214 | 0.164 | 0.197 | 0.237 | 0.362 | 0.233 | 0.231 | 0.222 | 0.190 | 0.243 | 0.252 |
| 14 | 0.235 | 0.200 | 0.175 | 0.197 | 0.251 | 0.320 | 0.234 | 0.229 | 0.229 | 0.180 | 0.252 | 0.263 |
| 15 | 0.204 | 0.214 | 0.165 | 0.198 | 0.245 | 0.298 | 0.243 | 0.235 | 0.229 | 0.177 | 0.275 | 0.291 |
| 16 | 0.197 | 0.204 | 0.161 | 0.244 | 0.234 | 0.291 | 0.226 | 0.235 | 0.211 | 0.190 | 0.288 | 0.273 |
| 17 | 0.221 | 0.204 | 0.169 | 0.264 | 0.226 | 0.273 | 0.229 | 0.229 | 0.223 | 0.197 | 0.256 | 0.255 |
| 18 | 0.211 | 0.214 | 0.173 | 0.242 | 0.219 | 0.265 | 0.338 | 0.227 | 0.231 | 0.204 | 0.238 | 0.240 |
| 19 | 0.184 | 0.203 | 0.183 | 0.237 | 0.230 | 0.262 | 0.418 | 0.234 | 0.212 | 0.201 | 0.258 | 0.219 |
| 20 | 0.179 | 0.195 | 0.205 | 0.253 | 0.288 | 0.277 | 0.289 | 0.234 | 0.222 | 0.190 | 0.269 | 0.206 |
| 21 | 0.187 | 0.189 | 0.202 | 0.356 | 0.244 | 0.278 | 0.256 | 0.233 | 0.232 | 0.197 | 0.285 | 0.217 |
| 22 | 0.183 | 0.184 | 0.180 | 0.251 | 0.232 | 0.266 | 0.242 | 0.237 | 0.218 | 0.216 | 0.301 | 0.230 |
| 23 | 0.237 | 0.180 | 0.184 | 0.216 | 0.236 | 0.255 | 0.231 | 0.231 | 0.223 | 0.195 | 0.281 | 0.241 |
| 24 | 0.249 | 0.180 | 0.186 | 0.206 | 0.263 | 0.253 | 0.228 | 0.226 | 0.227 | 0.194 | 0.250 | 0.246 |
| 25 | 0.223 | 0.187 | 0.190 | 0.202 | 0.242 | 0.253 | 0.223 | 0.233 | 0.231 | 0.194 | 0.253 | 0.237 |
| 26 | 0.418 | 0.202 | 0.215 | 0.206 | 0.232 | 0.258 | 0.218 | 0.243 | 0.227 | 0.198 | 0.277 | 0.230 |
| 27 | 0.216 | 0.206 | 0.197 | 0.206 | 0.256 | 0.247 | 0.215 | 0.236 | 0.235 | 0.202 | 0.280 | 0.220 |
| 28 | 0.200 | 0.207 | 0.206 | 0.210 | 0.227 | 0.263 | 0.224 | 0.216 | 0.237 | 0.204 | 0.261 | 0.222 |
| 29 | 0.198 | | 0.210 | 0.200 | 0.229 | 0.263 | 0.219 | 0.269 | 0.233 | 0.205 | 0.245 | 0.228 |
| 30 | 0.187 | | 0.188 | 0.203 | 0.233 | 0.341 | 0.225 | 0.242 | 0.235 | 0.206 | 0.236 | 0.235 |
| 31 | 0.186 | | 0.170 | | 0.237 | | 0.234 | 0.220 | | 0.193 | | 0.211 |
| MED | 0.215 | 0.206 | 0.191 | 0.201 | 0.241 | 0.306 | 0.265 | 0.236 | 0.222 | 0.206 | 0.257 | 0.234 |
| MÍN | 0.179 | 0.180 | 0.161 | 0.128 | 0.219 | 0.245 | 0.215 | 0.216 | 0.204 | 0.177 | 0.218 | 0.206 |
| MAX | 0.418 | 0.235 | 0.217 | 0.356 | 0.288 | 0.538 | 0.482 | 0.269 | 0.237 | 0.237 | 0.301 | 0.291 |

ANEXO N° 2

OPERACIÓN MEDIA MÓVIL

Según McCuen y Snyder (1986), la media móvil es un método para separar las variaciones sistemáticas de las no sistemáticas. Está basado en la premisa de que los componentes sistemáticos exhiben alguna auto correlación mientras que las variaciones aleatorias no presentan auto correlación. Por lo tanto, el promedio de mediciones adyacentes elimina las fluctuaciones aleatorias, resultando una tendencia simétrica.

En general, el cálculo de la media móvil usa promedios de observaciones adyacentes para producir una nueva serie contiene la tendencia sistemática, para suavizar las series cronológicas, es decir, para reducir las fluctuaciones en las series. Generan nuevas series Y_t , y las series filtradas \widehat{Y}_t derivada por:

$$Y = \sum W_j Y_{i-k+j-1}$$

Donde $i = (k+1), (k+2), \dots, (k+n)$

n es la longitud de las series, m es la longitud de los intervalos suavizados, W_j es el intervalo dado para el valor de j th en la serie suavizada, K está dada por:

$$k = \frac{m - 1}{2}$$

Es un promedio aritmético que suaviza la curva y se convierte en una línea o curva de tendencia, permitiendo analizar su inicio y su final. No proporciona cambios de tendencia pero si los puede confirmar.

Tiene la particularidad de que cada día que pasa se elimina el primer día de la serie en el cálculo y se añade el último día. A efecto del análisis presente la crítica de que solamente tiene en cuenta el período sobre el que se calcula, y concede la misma importancia al primer día de la serie que al último.

ANEXO N° 3

FOTOGRAFIAS

ANTES DE LA CAPTACIÓN



DESPUES DE LA CAPTACIÓN

