

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

BASES DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN DIQUES TRANSVERSALES PARA LA CAPTACIÓN Y TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

DANNY RAÚL ROJAS VÁSQUEZ

drojas647@gmail.com

HÉCTOR DANIEL TARAMBIS ENRIQUEZ

dannyfilt@yahoo.es

DIRECTOR: DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO

Quito, 2012

DECLARACIÓN

Nosotros, Danny Raúl Rojas Vásquez y Héctor Daniel Tarambis Enriquez, declaramos que el trabajo aquí escrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Danny Raúl Rojas Vásquez

Héctor Daniel Tarambis Enriquez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Danny Raúl Rojas Vásquez y Héctor Daniel Tarambis Enriquez, bajo mi supervisión.

DR. ING. MARCO CASTRO
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto de titulación no es únicamente un logro propio, por el contrario, no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas.

El agradecimiento más sentido va para mi familia, mi padre, mi madrecita querida y mis hermanas queridas, que sin su convicción en él logró de mis metas y sustento moral, no habría sido posible llegar hasta estas instancias.

A mi director, el Dr. Marco Castro, a quien siempre he admirado por su gran capacidad y talento humano demostrado a lo largo de todo el trayecto en la universidad, muchas gracias por brindarme su confianza, apoyo y capacidad en guiar mis ideas para llegar a un feliz término del proyecto.

A profesores de la Facultad de Ingeniería Civil Y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional por su disponibilidad y generosidad para compartir sus conocimientos

Finalmente, agradezco a mis grandes amigos de la universidad, como Santiago Vascones, Guido Manitio, Juan Pullupaxi, Andrés Eduardo Terán, Diego Enríquez entre otros, por su incondicional amistad y aliento durante todo este tiempo de arduo trabajo.

Danny Raúl Rojas Vásquez

AGRADECIMIENTOS

Te agradezco madre por estar conmigo por hacer de este sueño el tuyo también, por apoyarme, por luchar conmigo por todos tus consejos, motivaciones y por los valores que me enseñaste, ahora se reflejan en este triunfo, que es el tuyo también, gracias mamá lo logramos.

Gracias Hermana por ser un apoyo cuando más lo necesitaba, por estar a mi lado y por ayudarme a cumplir este sueño. Gracias Papa y Hermano por sus consejos que me ayudaron lo suficiente para lograr esta meta. Gracias Erika, durante este tiempo tu me ayudaste y me apoyaste este triunfo es para los dos.

Gracias Escuela Politécnica Nacional por ser mi segundo hogar.

Gracias a todos los Docentes de la Facultad de Ingeniería Civil en especial al Dr. Marco Castro quien nos apoyó con sus conocimientos para lograr este sueño.

Gracia a ustedes mis amigos por compartir conmigo estos años de estudio, jamás los olvidare.

Héctor Daniel Tarambis Enriquez

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios quien nunca me abandonado y ha sido la mano invisible que me ha levantado en los momentos más difíciles.

A mis padres Susana y Jaime, por brindarme su infinito amor, confiar en mí y darme la oportunidad de culminar mis estudios en pro de un futuro lleno de éxitos.

A mis hermanas Stefany, Ruth y Andrea, quienes me han brindado su cariño y amor, y han sido una motivación para alcanzar nuevos logros que me permitan velar por ellas.

A toda mi familia, mis primos (Ángel David Maldonado Vásquez, Guillermo Calahorrano, Cristian Rojas y Fabricio Vásquez), tíos (José Vásquez, Aurora Vásquez y María Vásquez) entre otros, por siempre tener confianza en mí y brindarme sus ánimos para cada día seguir adelante.

Y a una persona muy especial en mi vida, que ya no está aquí y Dios lo tiene en su gloria, mi abuelito José Manuel Vásquez López, a quien le debo mucho lo que soy hasta ahora, por estar siempre seguro de que iba a conseguir cosas grandes y por brindarme su apoyo en el tiempo que estuvo con vida, a quien va dedicado este gran logro con mucho cariño.

Danny Raúl Rojas Vásquez

DEDICATORIA

A mi madre Roció:

Por haberme ayudado a llegar hasta este punto de mi vida y lograr este triunfo, tus eres quién me enseñó a luchar por lo que quiero, quién me inculco los valores y me enseñó que un hombre debe vivir de pie y no arrodillado, eres quien nunca perdió la fe en mi y siempre creíste que podría lograr este sueño, este triunfo es para ti mamá.

A mi hermana Lorena:

Por su fuerza, su caridad y su valor como ejemplo su vida es extraordinaria y es digna de ser emulada.

A mi Padre y hermano:

Por sus consejos y apoyo.

A Erika:

Por darme un nuevo sueño y nueva meta junto a ti, este triunfo es para los dos.

Héctor Daniel Tarambis Enriquez

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA	V
DEDICATORIA	VI
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XVIII
GLOSARIO Y TERMINOLOGÍAS UTILIZADAS.....	XX
RESUMEN.....	XXVI
ABSTRACT	XXVII
PRESENTACIÓN	XXVIII
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4. MARCO LEGAL.....	5
1.4.1. ANÁLISIS LEGAL E INSTITUCIONAL PARA LA REGULACIÓN Y REGLAMENTACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL ECUADOR.....	5
CAPÍTULO 2.....	9
DEFINICIONES Y CONCEPTOS SOBRE CAUDAL ECOLÓGICO.....	9
2.1. INTRODUCCIÓN.....	9
2.1.1. RÉGIMEN HIDROLÓGICO NATURAL	9
2.1.2. PARÁMETROS A LOS CUALES NO SE LOS TOMARÁ EN CUENTA PARA LA DETERMINACIÓN DE UN CAUDAL ECOLÓGICO Y AMBIENTAL.....	10
2.1.3. DIFERENCIA ENTRE CAUDAL ECOLÓGICO Y AMBIENTAL.....	10
2.1.4. OBJETIVOS DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES.....	10

2.2. CONCEPTOS GENERALES.....	11
2.2.1. CAUDAL ECOLÓGICO	11
2.2.2. CAUDAL AMBIENTAL.....	12
2.3. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL CAUDAL ECOLÓGICO	13
2.3.1. CONDICIONES DE SERVICIO DE UN CAUDAL ECOLÓGICO:.....	13
2.4. METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA DETERMINACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL	14
2.4.1. HIDROLÓGICO:.....	16
2.4.2. HIDRÁULICA:.....	22
2.4.3. METODOLOGÍAS ECO – HIDRÁULICAS O DE SIMULACIÓN DE HÁBITAT	24
2.4.4. METODOLOGÍAS HOLÍSTICAS.....	28
2.5. EXPERIENCIAS DE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES APLICADAS EN LATINOAMÉRICA	32
CAPÍTULO 3.....	35
BASES Y RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS PARA LA CAPTACIÓN Y TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	35
3.1. INTRODUCCIÓN.....	35
3.2. ECOSISTEMAS Y TRANSPORTE DE CAUDAL ECOLÓGICO	36
3.2.1. GEOLOGÍA Y CLIMA	36
3.2.2. VELOCIDAD DE FLUJO.....	36
3.2.3. ADAPTACIÓN DE LAS ESPECIES ACUÁTICAS EN LOS RÍOS	36
3.2.4. TEMPERATURA	37
3.2.5. OXÍGENO.....	38
3.3. MEDIOS ACUÁTICOS.....	38
3.3.1. ESPECIES ACUÁTICAS	39
3.3.2. MIGRACIÓN Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS PECES	39
3.4. OBRAS DESTINADAS A LA REHABILITACIÓN DE LA CONECTIVIDAD FLUVIAL DE ESPECIES ACUÁTICAS EN EL MEDIO FLUVIAL.....	42
3.4.1. ELIMINACIÓN DEL OBSTÁCULO.....	42
3.4.2. CAPTURA Y TRANSPORTE DE PECES CON CAMIONES	43
3.4.3. RÍOS LATERALES	43
3.4.4. DISPOSITIVOS DE PASO.....	43
3.5. CAUDAL Y LAS CONDICIONES DE FLUJO EN EL PASO DE PECES.....	55
3.6. LONGITUDES Y DIMENSIONES DE UN PASO PARA PECES	55

3.7. CONDICIONES GENERALES A CUMPLIRSE EN UN DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO	56
3.8. TIPOS DE DISPOSITIVOS DE PASO	57
3.8.1. ESCLUSA PARA PECES	57
3.8.2. ASCENSORES PARA PECES	64
3.8.3. RÍO ARTIFICIAL	70
3.8.4. ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS O ESCALA DE ARTESAS	73
3.8.5. RAMPA PARA PECES	86
3.8.6. ESCALA DE RALENTIZADORES	97
3.8.7. PASOS DE ESCOTADURAS VERTICALES	105
CAPÍTULO 4.....	112
ANÁLISIS CRÍTICO DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	112
4.1. INTRODUCCIÓN.....	112
4.2. ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES FACTORES EN LA IMPLANTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE PASO	112
4.2.1. BIOLÓGICOS.....	113
4.2.2. HIDRÁULICOS.....	113
4.2.3. HIDROLÓGICOS.....	114
4.2.4. TOPOGRÁFICOS.....	114
4.3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA Y MORFOLÓGICO DEL RÍO	114
4.3.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA	114
4.3.2. EL ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL RÍO	115
4.3.3. ANÁLISIS GENERAL DE LAS CAPACIDADES NATATORIAS DE LOS PECES	123
4.4. ANÁLISIS EN LA CONCESIÓN DE CAUDAL CIRCULANTE QUE TRANSITARA POR EL DISPOSITIVO DE PASO.	129
4.4.1. USO DEL CAUDAL ECOLÓGICO COMO CAUDAL CIRCULANTE	129
4.4.2. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON EL DISPOSITIVO DE PASO.....	130
4.4.3. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON LAS CAPACIDADES DE FRANQUEO DEL PEZ.....	131
4.5. ANÁLISIS GENERAL DE LOS DIFERENTES OBSTÁCULOS PRESENTES EN LOS RÍOS.....	132
4.5.1. EFECTO BARRERA DE LOS OBSTÁCULOS.....	133
4.5.2. ANÁLISIS DE LA UTILIDAD DEL OBSTÁCULO	133

4.5.3. RIESGOS PARA LA FAUNA ACUÁTICA CAUSADA POR LOS DIFERENTES OBSTÁCULOS	134
4.6. ANÁLISIS GENERAL DEL DISPOSITIVO DE TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	135
4.6.1. ANÁLISIS EN LA ENTRADA DEL DISPOSITIVO.....	136
4.6.2. ANÁLISIS EN EL DISPOSITIVO PROPIAMENTE DICHO.....	137
4.6.3. ANÁLISIS EN LA SALIDA DEL DISPOSITIVO	139
4.7. DESCENSO DE LOS PECES EN EL DISPOSITIVO DE PASO	140
4.7.1. SOLUCIONES TÉCNICAS PARA EVITAR EL DESCENSO DEL PEZ POR ESTRUCTURAS NO ADECUADAS EN SU MIGRACIÓN AGUAS ABAJO.....	141
4.7.2. ANÁLISIS PARA EL DESCENSO DEL PEZ EN LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS DE PASO.....	143
4.8. SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL MEDIO FLUVIAL EN EL ECUADOR	145
4.8.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN EL PAÍS	145
4.8.2. SITUACIÓN DE LAS PRINCIPALES CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN EL ECUADOR.....	145
4.8.3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FLUVIAL Y ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN EL ECUADOR.....	148
4.8.4. ICTIOFAUNA EN EL ECUADOR.....	151
CAPÍTULO 5.....	153
BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS DE PASO EN DIQUES TRANSVERSALES PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	153
5.1. INTRODUCCIÓN.....	153
5.2. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA PLANTEAR LAS BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	153
5.2.1. VALORACIÓN DEL OBSTÁCULO	154
5.2.2. ELECCIÓN Y ESTIMACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE NADO DE LA ESPECIE OBJETIVO O INSIGNIA PARA EL DISEÑO DEL DISPOSITIVO.....	155
5.2.3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIDROLÓGICAS ACTUANTES.....	162
5.2.4. CRITERIOS A TOMAR EN CUENTA PARA LA CORRECTA UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	164
5.2.5. ELECCIÓN DEL TIPO DE DISPOSITIVO DE PASO	164

5.2.6. BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO GENERAL DEL DISPOSITIVO.....	168
CAPÍTULO 6.....	172
APLICACIÓN EN EL CASO DE UN RÍO DEL ECUADOR.....	172
6.1. INTRODUCCIÓN.....	172
6.2. EJERCICIO PRÁCTICO	172
6.3. CÁLCULO DEL EJERCICIO	173
6.3.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	173
6.3.2. ELECCIÓN DE LA ESPECIE OBJETIVO	173
6.3.3. UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO	174
CAPÍTULO 7.....	184
MONOGRAFÍA DE DISEÑO.....	184
7.1. INTRODUCCIÓN.....	184
7.2. PLAN DE DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	184
CAPÍTULO 8.....	186
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	186
8.1. CONCLUSIONES	186
8.2. RECOMENDACIONES	189
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	191
ANEXOS.....	195
ANEXO N°1	196
FOTOS DE DIFERENTES TIPOS DE OBSTÁCULOS PRESENTES EN LOS RÍOS.....	196
ANEXO N°2	198
FOTOS DE DIFERENTES TIPOS DE DISPOSITIVOS DE PASO PARA EL TRÁNSITO DE CAUDAL ECOLÓGICO.....	198
ANEXO N°3	203
SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL MEDIO FLUVIAL EN EL ECUADOR	203
ANEXO N°4	208
TIPOS DE PECES PRESENTES EN ECUADOR.....	208
ANEXO N°5	211
PLAN DE DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	211
ANEXO N°6	214
DISEÑO DEL EJERCICIO PRÁCTICO DE LA ESCALA DE ESTANQUES SUCESIVOS	214

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1	RESUMEN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL.....	15
TABLA 2.2	ESTIMACIONES DEL CAUDAL AMBIENTAL POR EL MÉTODO MONTANA.....	18
TABLA 2.3	METODOLOGÍAS APLICADAS EN LATINOAMÉRICA.....	33
TABLA 2.4	BALANCE GENERAL DE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS.....	34
TABLA 3.1	DIMENSIONES A EMPLEARSE EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL PEZ.....	82
TABLA 3.2	VALORES DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LOS DEFLECTORES EN UN PASO TIPO DENIL DEPENDIENDO DE LA ANCHURA DEL CANAL SELECCIONADO, LONNEBJERG (1980) Y LARINIER (1992). .	101
TABLA 3.3	VALORES DE REFERENCIA PARA ANCHOS DE CANAL Y PENDIENTES EN LOS RALENTIZADORES TIPO DENIL (Larinier 1983).....	101
TABLA 3.4	DIMENSIONES MÍNIMAS PARA LOS DIFERENTES TAMAÑOS DE PECES CALCULADO PARA $\Delta H = 0.20 \text{ m}$	110
TABLA 4.1.	M-PORCENTAJE DE SEDIMENTO TRANSPORTADO.....	122
TABLA 4.2.	EFFECTO BARRERA PRODUCIDO POR LOS OBSTÁCULOS	133
TABLA 4.3.	SOLUCIONES PARA LOS PROBLEMAS GENERADOS EN ÉPOCAS DE ESTIAJE	137
TABLA 4.4.	POSIBLES FACTORES CAUSANTES DE UN FUNCIONAMIENTO DEFICIENTE Y SUS POSIBLES SOLUCIONES EN LOS DISPOSITIVOS DE TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO	139
TABLA 4.5.	POSIBLES SOLUCIONES EN LA SALIDA DEL DISPOSITIVO	140
TABLA 4.6.	DIVISIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN EL PAÍS.....	145

TABLA 5.1. VARIABLES NECESARIAS PARA ESTIMAR CUANTITATIVAMENTE LAS CAPACIDADES DE LOS PECES.....	157
TABLA 5.2. RELACIÓN DE LOS DIFERENTES ÁBACOS CON LAS CAPACIDADES DE NADO DE LOS PECES, PARA UN CORRECTO DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO DE PASO	161
TABLA 5.3. PARÁMETROS A ESTUDIAR EN EL RÍO, PARA DETERMINAR LAS BASES DE DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO.....	163
TABLA 5.4. ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE PASO.....	166
TABLA 6.1. ESPECIES DE PECES A SER ANALIZADAS.....	174
TABLA 6.2. ALTURA DE LOS TABIQUES INTERIORES DEL DISPOSITIVO	179

..

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	PROCESO DEL MODELO PHABSIM.....	26
FIGURA 3.1	ADAPTACIONES DE LAS FORMAS CORPORALES DE LOS PECES A DIFERENTES VELOCIDADES DE FLUJO.....	37
FIGURA 3.2	VISTA AÉREA DE LA PRESA EN NEEF EN EL RÍO MOSELLE (RENANIA- PALATINADO), PARA MOSTRAR EL TAMAÑO DEL PASO DE LOS PECES (FLECHA) EN COMPARACIÓN CON EL TAMAÑO TOTAL DE LA PRESA.	46
FIGURA 3.4	POSICIÓN ÓPTIMA DE UN CANAL DE DESVIACIÓN Y DE UN PASO TÉCNICO DE PECES.....	47
FIGURA 3.5	IMPLANTACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PASO.....	48
FIGURA 3.6	DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA DESCARGA ADICIONAL A TRAVÉS UN BYPASS, PARA AUMENTAR LA ATRACCIÓN DEL FLUJO EN LA ENTRADA DEL PASO DE PECES.	50
FIGURA 3.7	RAMPA DE ESCOLLERA SUBMARINA CONECTADA A LA ENTRADA DEL PASO DE PECES.....	51
FIGURA 3.8	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS DIMENSIONES DE LA POZA. ..	52
FIGURA 3.9	DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS NIVELES DE CABECERA EN EL DISPOSITIVO DE PASO Y UBICACIÓN DE LA COMPUERTA REGULABLE.....	53
FIGURA 3.10	ESQUEMA DE UNA ESCLUSA CON PASO VERTICAL Y CON PLANCHA DE FLOTACIÓN MECÁNICA.....	60
FIGURA 3.11	FUNCIONAMIENTO DE LA ESCLUSA TIPO BORLAND.....	61
FIGURA 3.12	DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ASCENSOR PARA PECES TIPO HOPPER.....	67
FIGURA 3.13	ESQUEMA DE DISEÑO Y COMPONENTES DEL ASCENSOR PARA PECES.....	68

FIGURA 3.14 DISEÑO CONCEPTUAL DE UN RÍO ARTIFICIAL.....	70
FIGURA 3.15 DISTANCIA LIBRE ENTRE ROCAS.....	72
FIGURA 3.16 VISTA DE UNA ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS EN FLUJO CON CAÍDA LIBRE.....	74
FIGURA 3.17 VISTA DE IZQUIERDA A DERECHA DE UNA ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS CON ESCOTADURA SEMISUMERGIDA Y CON ORIFICIO SUMERGIDO.....	75
FIGURA 3.18 VISTA GENERAL DE UNA ESCALA DE ARTESAS.....	77
FIGURA 3.19 ESQUEMA DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FLUJOS DE IZQ. A DER. FLUJO EN PROFUNDIDAD – FLUJO EN SUPERFICIE.....	78
FIGURA 3.20 POSICIONES ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS O ARTESAS (Larinier 1992).....	78
FIGURA 3.21 ESTANQUES SUCESIVOS CON ESCOTADURA Y ORIFICIO SUMERGIDO.....	82
FIGURA 3.22 ARTESA EN CURVA.....	85
FIGURA 3.23 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA RAMPA PARA PECES DE MÁXIMA ANCHURA.....	86
FIGURA 3.24 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA RAMPA PARA PECES DE ANCHURA PARCIAL.....	87
FIGURA 3.25 DE ARRIBA - ABAJO. ESQUEMA DE UNA RAMPA CONVENCIONAL - ESQUEMA DE UNA RAMPA CON INCORPORACIONES DE BLOQUES DE PIEDRA - ESQUEMA DE UNA RAMPA TIPO RÁPIDO REMANSO.....	89
FIGURA 3.26 RAMPA CONFORMADA POR LA DISPOSICIÓN DE ROCAS ALEATORIAS	92
FIGURA 3.27 GRÁFICO REPRESENTATIVO DE UNA RAMPA CONFORMADA POR ESTANQUES DE ROCA.....	94
FIGURA 3.28 ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESCALA DE RALENTIZADORES.....	98
FIGURA 3.29 DIMENSIONAMIENTO DE LOS RALENTIZADORES TIPO DENIL	102
FIGURA 3.30 RELACIÓN DE $h^* = f(h_0)$	102
FIGURA 3.31 DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD CARACTERÍSTICA EN UN RALENTIZADOR TIPO DENIL (KRUGER, 1994).....	104
FIGURA 3.32 ESQUEMA GENERAL DE LA SECCIÓN DEL DISPOSITIVO.	109
FIGURA 3.33 ESQUEMA DEL DISPOSITIVO DE PASO DE ESCOTADURAS VERTICALES.....	110

FIGURA 4.1. VARIACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE HÁBITAT SOMERO EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL.....	120
FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE HJULSTROM, QUE RELACIONA LA VELOCIDAD DE ESCURRIMIENTO CON EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS	121
FIGURA 4.3. ILUSTRACIÓN DEL SALTO DE UN PEZ	127
FIGURA 5.1. VELOCIDAD MÁXIMA VS LONGITUD DEL PEZ.....	158
FIGURA 5.2. TIEMPO DE PERMANENCIA VS LONGITUD DEL PEZ.....	159
FIGURA 5.3. TIEMPO DE PERMANENCIA VS VELOCIDAD DE NADO	160

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS	195
ANEXO N°1	196
FOTOS DE DIFERENTES TIPOS DE OBSTÁCULOS PRESENTES EN LOS RÍOS	196
ANEXO N°2	198
FOTOS DE DIFERENTES TIPOS DE DISPOSITIVOS DE PASO PARA EL TRÁNSITO DE CAUDAL ECOLÓGICO	198
ANEXO N°3	203
SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL MEDIO FLUVIAL EN EL ECUADOR	203
ANEXO N°4	208
TIPOS DE PECES PRESENTES EN ECUADOR.....	208
ANEXO N°5	211
PLAN DE DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	211
ANEXO N°6	214
DISEÑO DEL EJERCICIO PRÁCTICO DE LA ESCALA DE ESTANQUES SUCESIVOS	214

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

IRF: International River Foundation

TNC: The Nature Conservancy

WWF: World Wildlife Found

GIRH: Gestión Integrada de Recursos Hídricos

SENAGUA: Secretaría Nacional del Agua

CONELEC: Consejo Nacional de Electricidad

MAE: Ministerio del Ambiente

GAD: Gobiernos Autónomos Descentralizados

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación

COOTAD: Código Orgánico de Ordenamiento Territorial Autonomía y Descentralización

UICN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

GWP: Global Water Partnership

°C: Grados Centígrados

mg: Miligramos

l: Litros

m: Metros

s: Segundos

W: Watts

kg: Kilogramos

cm: Centímetros

m/m: Pendiente

mm: Milímetros

GLOSARIO Y TERMINOLOGÍAS UTILIZADAS

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 demostrándose las diferentes evoluciones y cambios de los ecosistemas existentes en el planeta.

Prelación: Grado de prioridad en que se debe atender algún asunto

Ecosistémico: Proceso a través del cual la naturaleza, produce resultados beneficiosos para los seres humanos y el resto de la naturaleza; tales como: agua limpia, madera, paisajes, protección de especies, mitigación de fenómenos climáticos, entre otros. Donde se asegure la sustentabilidad del recurso a largo plazo.

Dulceacuícola: Plantas y animales que desarrollan todas sus funciones vitales en agua dulce.

Estuario: Desembocadura de un río, caracterizada por tener esta, en forma semejante al corte longitudinal de un embudo, debido a la influencia de las mareas en la unión de las aguas fluviales con las marítimas.

Desovar: Soltar los huevos de la hembras de los peces, anfibios e insectos

Estrés Hídrico: Cuando la demanda de agua es más importante que la cantidad disponible durante un período determinado, o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad. Generalmente provoca un deterioro de los recursos de agua dulce, en términos de cantidad como: acuíferos sobre explotados, ríos secos; y

calidad como: eutrofización, contaminación de la materia orgánica, intrusión salina.

Eutrofización: Enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema

Delta Fluvial: Territorio triangular, formado en la desembocadura de un río, mediante sedimentos, que se van depositando a medida que la velocidad de flujo del río desaparece. Se encuentra compuesta por brazos o caños fluviales, que separan las islas formadas por los sedimentos depositados.

Piscicultura: Técnica de criar y fomentar la reproducción de especies acuáticas

Holístico: Consiste en el análisis de eventos desde múltiples interacciones, por lo que no puede ser determinado como la suma de sus componentes, donde se concluye que el sistema completo se comporta como una gama de multiplicidad de eventos, donde para resolver este sistema se opta por modelaciones dinámicas.

Acuífero: Estrato o formación geológica permeable que permite la circulación y almacenamiento de agua subterránea por sus pozos o grietas.

Batimetría: Ciencia que mide las profundidades marinas, con el fin de determinar la topografía del fondo del mar, realizadas actualmente vía GPS, de donde se basan las cartas batimétricas.

Factores Abióticos: Son los distintos componentes que determinan el espacio físico en cual habitan los seres vivos, entre los más importantes podemos encontrar: el agua, la temperatura, la luz, el pH, el suelo, la humedad, el aire y los nutrientes.

Factores Bióticos: Organismos vivos que interactúan con otros seres vivos, flora y fauna de un lugar, con sus respectivas interacciones, las cuales establecen relaciones entre los seres vivos de un ecosistema con las condiciones que condicionan su existencia de vida.

Ciclo Hidrológico: Proceso por el cual se describe la ubicación y el movimiento del agua en nuestro planeta, en el que continuamente la partícula de agua evaporada del océano vuelve al océano, después de pasar por la etapa de:

precipitación, escorrentía superficial y subterránea. Ciclo que se basa permanentemente en el movimiento o transferencia de masas de agua de un sitio a otro, a través de sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso; siendo el flujo de agua, generado por dos causas principales: la energía solar y la gravedad.

Escorrentía Superficial: Cuando la partícula de agua, circula sobre la superficie y se concentra en pequeños cursos de agua, los cuales se reúnen en arroyos y luego desembocan en los ríos (escorrentía superficial), donde el agua que se encuentra circulando, irá a parar a los lagos o al mar, donde una parte se evapora y la otra se infiltra en el terreno.

Escorrentía Subterránea: Se denomina al agua que descende por gravedad y alcanza la zona saturada, la cual constituye la recarga de agua subterránea, en donde esta puede volver a la atmósfera por evapotranspiración, cuando se encuentra próxima a la superficie del terreno, la cual pasa por los ríos, a través de los manantiales, donde se descarga directamente al mar, cerrando con esto el ciclo hidrológico.

Sistema fluvial: Sistema el cual depende de una gran cantidad de variables, las cuales modelan el hábitat de las especies y controlan los procesos ecosistémicos. Todas estas variables están en gran medida determinadas por el régimen hidrológico.

Caudal Ecológico: Cantidad de agua suficiente que circula en un cauce en condiciones óptimas, que permitan el desenvolvimiento natural de la vida bio – acuática y los ecosistemas aledaños.

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

Régimen Hidrológico: Es el modelo predominante del flujo de aguas en un período de tiempo, donde se hace referencia a la duración de las épocas de inundaciones como resultado de la cantidad de agua que hay en superficie (agua de superficie), las precipitaciones y el flujo de las aguas subterráneas.

Cuenca Hidrográfica: Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, drenando sus aguas al mar a través de un único río, vertiendo sus aguas a un

único lugar de desembocadura, se encuentra generalmente delimitada por una línea de cumbres comúnmente llamada divisoria de aguas.

Ecosistema Acuático: Son todos aquellos ecosistemas que tienen por biotopo algún cuerpo de agua, como pueden ser: mares, océanos, ríos, lagos, pantános, riachuelos y lagunas entre otros. Entre los tipos más de ecosistemas acuáticos tenemos: los ecosistemas marinos y los ecosistemas de agua dulce.

Régimen Ecológico: Caudal de agua mínimo que varía a lo largo del año naturalmente y sin sobresaltos.

Velocidad de Flujo: Velocidad a presentarse en el curso natural de un río.

Dispositivo de Paso: Estructura a diseñarse para permitir que la especie acuática pueda atravesar los diferentes obstáculos sin problemas y sobresaltos, asegurando además la continuidad del curso natural del río.

Período de Migración: Movimientos realizados por las especies acuáticas por cambios en las condiciones en su hábitat, busca de alimentos y desove de las mismas, los cuales son realizados en ciertas temporadas del año, dependiendo de cada especie.

Número de Froude: Es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, por medio de los cuales se permite relacionar los dos tipos de flujo como son los turbulentos y laminares que pueden presentarse en el curso natural del río.

Turbulencia: Movimientos bruscos presentados en el curso de agua de un río, presentándose con esto perturbaciones y velocidades elevadas en el curso natural del río.

Caudal de Atracción: Caudal que se genera en la entrada del dispositivo de paso, para permitir que el pez pueda ingresar al mismo, para poder franquear el obstáculo y pueda continuar con su curso natural en el río.

Flujo Laminar: Movimiento de un fluido de una manera ordenada, estratificada y suave. Se caracteriza porque el fluido se mueve en láminas paralelas sin

entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada también 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 en 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 o más precisamente caótica.

Capacidad de Nado: Relaciona la distancia recorrida por el pez en función de su velocidad a través del medio acuático, tamaño y la resistencia del mismo, de las cuales depende el diseño de todos los tipos de dispositivo de paso .

Calado Mínimo: Altura de agua mínima, en la cual la especie acuática puede transitar libremente por el dispositivo y el río (Caudal Ecológico).

Caudal Circulante: Caudal a pasar por el dispositivo que asegura una buena funcionabilidad del dispositivo así como también el desenvolvimiento del mismo por el mismo y el curso del río (Caudal Ecológico).

Especie Objetivo: Especie a tomar en cuenta para el diseño, debido a las capacidades de nado del pez y comportamiento de este en el río, del cual dependerá que otras especies parecidas a la misma puedan franquear el obstáculo y otras que a su vez no se encuentren dentro de las características de la misma no puedan lograr su objetivo.

Velocidad de Nado: Se define como la velocidad que puede mantener el pez durante un cierto período de tiempo ya sea en una hora (Velocidad de Cruce) o en un período corto de tiempo (Velocidad Máxima).

Capacidad de Salto: Capacidad intrínseca del pez, que se produce cuando este salta afuera del agua, debido a la presencia de un obstáculo o por una elevada velocidad de agua presente.

Distancia Recorrida: Distancia recorrida por el pez en cada oscilación en un tiempo determinado.

Sedimentación: Acumulación de materia orgánica en el fondo del sustrato de un río, debido al transporte de estos en el río.

Erosión: Desgaste de la superficie producida por la fricción presente entre el flujo del río y la superficie por la que pasa el mismo.

RESUMEN

Este proyecto de titulación se basa en la investigación de las diferentes estructuras (dispositivos de paso) que aseguren la continuidad del curso natural del río tanto aguas arriba como aguas abajo cuando se tiene la presencia de un obstáculo (diques transversales), teniendo como parámetro fundamental el caudal ecológico, caudal a circular por dichas estructuras el cual asegura además de la continuidad del curso natural del río, la preservación de las diferentes especies acuáticas presentes en los diferentes ecosistemas acuáticos, tomando como especie predominante al pez debido a que es una de las principales especies que mantiene el equilibrio en los ecosistemas acuáticos.

Para la estimación del caudal ecológico se menciona de manera informativa, las diferentes metodologías a emplearse para la estimación del caudal ecológico como son: hidrológica, hidráulica, simulación de hábitat y holística.

A continuación se procede a la determinación de las diferentes bases y criterios a emplearse para el correcto dimensionamiento hidráulico de los diferentes dispositivos de paso que aseguren el tránsito del caudal ecológico, de una manera sintetizada y didáctica, involucrando las diferentes condiciones hidráulicas, hidrológicas, biológicas y topográficas a presentarse en el curso del río y el dispositivo de paso propiamente dicho, dichas condiciones son base fundamental a cumplirse para en los distintos dispositivos, además de garantizar la correcta elección y ubicación de los mismos.

Posteriormente se llega a determinar las diferentes bases y criterios generales a cumplirse en todo tipo de dispositivo como son: caudal ecológico, tipos de obstáculos a presentarse en el curso natural del río, capacidades de nado del pez, elección del pez objetivo, ubicación del dispositivo, elección del tipo de dispositivo de paso, entrada y salida del dispositivo y el cuerpo del dispositivo.

A partir del cumplimiento de dichos parámetros generales, se procede al dimensionamiento hidráulico del dispositivo de paso óptimo, tomando en cuenta que el caudal de diseño deberá ser siempre el caudal ecológico.

ABSTRACT

This project is based on titration investigating different structures (step devices) to ensure continuity of the natural course of the river upstream and downstream when you have the presence of an obstacle (transverse dikes), with the basic parameter the ecological flow, flow to move along these structures which also ensures the continuity of the natural course of the river, the preservation of aquatic species present in the different aquatic ecosystems, on the predominant species to fish because it is one of the main species that maintains balance in aquatic ecosystems.

To estimate the ecological flow mentioned in an informative, the different methodologies used to estimate environmental flow as: hydrology, hydraulics, habitat simulation and holistic.

Then proceed to the determination of the different bases and criteria to be used for the correct sizing of the various hydraulic devices step to ensure environmental flow traffic, and synthesized in a didactic, involving different hydraulic conditions, hydrological, biological and topographic arise in the course of the river and the device itself step, these conditions are met for a fundamental basis in different devices, and ensure the correct choice and their location.

After that we determine the different bases and criteria to be met in all types of devices such as: ecological flow, types of obstacles to occur in the natural course of the river, the fish swimming abilities, choice of fish target device location, choice of passer, and out of the device and the device body.

Effective implementation of these general parameters, we proceed to the hydraulic device sizing optimal step, considering that the design flow should always be the ecological flow.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto se enmarca en determinar las bases y restricciones a emplearse para el correcto dimensionamiento de los dispositivos de paso que aseguren el tránsito del caudal ecológico, cuando exista la presencia de obstáculos como diques transversales en el curso natural del río.

El primer capítulo presenta una breve introducción del problema a ser analizado de manera general, los objetivos, la justificación y el marco legal en el Ecuador.

El segundo capítulo sintetiza las diferentes definiciones y conceptos de caudal ecológico con sus respectivas metodologías para su estimación, por medio de los siguientes temas principales como son: introducción, conceptos generales y las metodologías utilizadas para la determinación y estimación del caudal ecológico.

El tercer capítulo explica a detalle las diferentes bases y restricciones para el dimensionamiento hidráulico de las estructuras para la captación y tránsito del caudal ecológico abordando los siguientes temas principales: introducción, ecosistemas y transporte de caudal ecológico, medios acuáticos, obras destinadas a la rehabilitación de la conectividad fluvial de especies acuáticas en el medio fluvial, caudal y las condiciones de flujo en el paso de peces, longitudes y dimensiones de un paso para peces, condiciones generales a cumplirse en un dispositivo de paso y los tipos de dispositivos de paso.

El cuarto capítulo hace referencia a un análisis crítico de la información existente en los capítulos anteriores los principales problemas a generarse , por medio del estudio de los siguientes temas principales, como son: análisis de los principales factores en la implantación de un dispositivo de paso, análisis hidrológico de la cuenca y morfológico del río, análisis en la concesión de caudal circulante que transitará por el dispositivo de paso, análisis general de los diferentes obstáculos presentes en los ríos, análisis general del dispositivo de tránsito del caudal ecológico, descenso de los peces en el dispositivo de paso, síntesis de la situación actual del medio fluvial en el Ecuador.

El capítulo quinto, muestra las bases y criterios generales a tomar en cuenta para el correcto dimensionamiento de los distintos dispositivos de paso en diques transversales para el tránsito del caudal ecológico, a partir de la información obtenida en los capítulos 3 y 4.

El capítulo sexto hace referencia a un ejercicio práctico del diseño de un dispositivo de paso para el caso de un río en el Ecuador.

El capítulo séptimo hace referencia a la elaboración de una monografía de diseño en el cual se presenta un plan general del diseño de un dispositivo de paso para el tránsito del caudal ecológico, aplicable a todos los diferentes tipos de dispositivos de paso existentes.

El capítulo final, presenta las conclusiones a las que se llegaron durante el desarrollo de este proyecto, así como las recomendaciones a tomar en cuenta para el correcto dimensionamiento de los diferentes dispositivos de paso.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Junto al desarrollo económico de los países se ha sostenido el concepto de aprovechamiento de recursos hídricos de una manera más integral con la finalidad de ayudar a la sustentabilidad de los recursos naturales, esta iniciativa favorece directamente al aprovechamiento de los sistemas acuáticos para tener medios de sustentación y de servicios a la población.

En estos últimos años, la disponibilidad para que los ecosistemas accedan al agua dulce es cada vez más crítica, los regímenes hidrológicos de las distintas cuencas hidrológicas se han visto afectados, debido al cambio climático generado por el ser humano y al aprovechamiento del recurso hídrico sin una gestión adecuada. Las actividades productivas, la extracción de agua en los ríos para el consumo y riego, como también el aprovechamiento hídrico para generación de energía, ha influenciado directamente a que el régimen hidrológico se altere circunstancialmente, viéndose afectado directamente los ecosistemas, alterando el flujo normal del río, influenciado a que se produzca cambios graves en los hábitats de las especies en los ecosistemas, por estos motivos se debe concientizar a los gobiernos a incluir en cualquier proyecto de extracción de agua un sistema adecuado para asegurar la continuidad del río en todo su trayecto.

La Asociación Mundial para el Agua (GWP), ha iniciado actividades que se dirigen hacia el apoyo de gestiones técnicas y políticas para el establecimiento de caudales que preserven y aseguren a futuro los ecosistemas fluviales, con el fin de promover el desarrollo de una legislación adecuada y existan los correctos acuerdos institucionales, que permitan el manejo de caudales que cumplan con

los requerimientos ambientales de las especies y el funcionamiento integral de los ecosistemas fluviales.

De tal forma, se ha venido generalizando la necesidad de establecer un caudal mínimo que asegure de manera sustentable el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y sus componentes, este caudal mínimo se le denomina caudal ecológico que es una alternativa que busca el asegurar la vida de las especies acuáticas y la conservación de los ecosistemas. Este caudal directamente aseguraría un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, reconociendo que para conservar la diversidad los bienes y servicios ambientales que brindan los sistemas acuáticos. Para que se dé el equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas se debe establecer que en el río fluya un mínimo de agua y que este asegure la subsistencia del ecosistema, equilibrando en conjunto con las necesidades humanas para el cual ha sido destinado el régimen hidrológico en cuestión, a este caudal se le denomina caudal ambiental.

El criterio más coherente es el que relaciona las exigencias de hábitat que tienen las especies acuáticas con las variaciones de las características de éste en función de los caudales circulantes. Diferentes autores han utilizado metodologías basadas en este criterio, entre los que cabe señalar a Tennant (1976), que analiza cualitativamente el hábitat piscícola en función de la hidrología de la cuenca vertiente.

El asegurar un caudal para la subsistencia de los ecosistemas no es una tarea fácil, de las diferentes metodologías utilizadas, algunas no aseguran que el caudal ecológico calculado sea el necesario para la subsistencia de los ecosistemas acuáticos como de las especies piscícolas y otros son de costo muy elevados por la cantidad de estudios que hay que realizar, en el Ecuador la regularización de caudal ecológico tanto como su continuidad en el río y como debería ser transportado al franquear un obstáculo esta en tema de análisis y estudio.

Tanto por requerimientos legales como por las prácticas establecidas de construcción de presas y sistemas de captación de agua, todas las obras que se construyen en Ecuador deberán tener instalaciones hidráulicas que permitan el

paso de caudales ecológicos y por lo tanto asegurar la vida de las especies piscícolas, que son primordiales para el comercio humano, además de ser una fuente importante en el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Se ha vuelto también muy común el instalar estos dispositivos en presas más antiguas, que originalmente no las tuvieron, de modo de asegurar que permitan el paso de los caudales ecológicos y la continuación de la vida acuática aguas abajo y aguas arriba del río. Los dispositivos de paso para peces son una de las obras que permiten el curso de caudal ecológico junto a las especies que permanecen en los ríos, por lo que es obligación del Ecuador avanzar en esta temática.

Razón por la cual la presente tesis se referirá a las bases y criterios a tener en cuenta para asegurar la continuidad de la vida acuática en el río en conjunto con la circulación del caudal ecológico, de tal modo que se pueda establecer un diseño y dimensionamiento de un tipo de dispositivo de paso de caudal ecológico que cumpla adecuadamente con los diferentes requerimientos hidráulicos de estos en función de la continuidad de la vida en el río.

Los obstáculos que necesitan de un dispositivo de paso para peces, pueden ser naturales o artificiales, y además pueden afectar tanto a especies nativas como a peces introducidos Saúl (1970). Como puede verse en los ejemplos anteriores, la misma decisión de dónde deberá establecerse una represa a lo largo de un sistema fluvial, así como si debe proveerse de obras que permitan el paso de peces, podrá tener repercusiones ambientales extensas e inesperadas, por este motivo será muy importante que la parte del dimensionamiento hidráulico pueda garantizar el transporte de este caudal y el respectivo funcionamiento de la estructura dimensionada, de tal forma que las especies acuáticas circulen mediante la estructura tanto aguas arriba como aguas abajo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

- Determinar y proponer de acuerdo a un estudio y análisis de la teoría y metodología planteada por diferentes autores sobre el tema de caudal ecológico y dispositivos de tránsito del mismo, las bases y criterios de

diseño de estructuras en diques transversales para la captación y tránsito del caudal ecológico, para un uso aplicable a las obras hidráulicas en el país.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Sintetizar definiciones y conceptos de caudal ecológico basados en propuestas de estudios realizados en el país e información recopilada de diferentes autores.
- Estudio y síntesis de las bases y restricciones, planteadas por los diferentes autores en la temática de los dispositivos utilizados para el transporte de caudal ecológico.
- Exponer un análisis crítico de la información obtenida de varios autores sobre las bases y criterios para el dimensionamiento de las estructuras para el tránsito del caudal ecológico.
- Plantear de acuerdo a la información recopilada, una base de diseño para el dimensionamiento hidráulico de las estructuras en diques transversales para la captación y tránsito de caudal ecológico.
- Aplicar las bases y criterios propuestos del dimensionamiento hidráulico, para el tránsito de caudal ecológico, en un ejemplo práctico.
- Entregar una monografía de diseño del tema en forma didáctica y aplicable en la práctica de obras hidráulicas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las necesidades que tiene el ser humano de servirse de los recursos hídricos, hacen que necesariamente recurran a los ríos, los cuales se ven afectados por las diferentes estructuras hidráulicas construidas en el sitio, afectando directamente a la continuidad del río y en sí a los ecosistemas, la poca información en el Ecuador del diseño de dispositivos que ayuden a solucionar este problema, hace necesario el proponer un estudio analítico del caudal ecológico, además del diseño de estructuras que garanticen el tránsito del mismo para la preservación y conservación de los ecosistemas acuáticos como las especies piscícolas, que debido a acciones humanas se encuentra en un estado de alerta a nivel mundial.

Muchos ríos en nuestro país poseen una riqueza piscícola abundante, los parámetros y características en las que se desenvuelve la vida en los ríos son muy complejos, justificación para preocuparse de las necesidades de paso de las especies nativas radica en su complicado estatus de conservación. Una proporción importante de los peces ecuatorianos de agua dulce actualmente se considera vulnerable o en peligro de extinción donde las diferentes estructuras hidráulicas para el transporte de caudal ecológico actualmente construidas, no garantizan que estén diseñadas bajo un estudio correcto o se hayan basado en una guía aplicable en los ríos del Ecuador y mucho más que estas puedan transportar la vida acuática, tanto aguas arriba como aguas abajo, es por ese motivo que nuestra tesis se dirige en emitir las bases de diseño de estructuras en diques transversales para la captación y tránsito del caudal ecológico, esto permitirá que el profesional encargado pueda tener una guía y una base para el respectivo cálculo del dimensionamiento de las estructuras que permitan un tránsito adecuado al tipo de vida que fluye por el río.

1.4. MARCO LEGAL

1.4.1. ANÁLISIS LEGAL E INSTITUCIONAL PARA LA REGULACIÓN Y REGLAMENTACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL ECUADOR

Este análisis se encuentra basado en la última Constitución de la República del Ecuador, del año 2010, la cual fue analizada y estudiada en el año 2008, pero aprobada en el año citado anteriormente, donde se ha analizado cuidadosamente todas las leyes y estatutos, de las diferentes leyes y reglamentos, implicados con el manejo y gestión de los recursos hídricos, y caudal ecológico, analizados en dichos artículos, se ha tomado en cuenta los artículos y leyes, que tengan sólo que ver con lo anteriormente mencionado, que son el caso de nuestro estudio. Tomando en cuenta que todavía este proyecto de ley se encuentra actualmente en discusión, por la Asamblea Nacional Constituyente del Ecuador, pero sin embargo se ha tomado en cuenta, debido a que tenemos que contar con una información actual del tema, para que todo lo analizado en los capítulos siguientes

tengan la credibilidad y responsabilidad del caso, ya que el tema lo amerita, por un buen futuro de nuestro país al que tanto queremos.

1.4.1.1. Competencias institucionales en el país relacionadas con caudales ecológicos

La SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua), a través de las nueve demarcaciones hidrográficas y de los denominados “CONSEJOS DE CUENCA” que, por lo pronto, no existen, creadas por la misma institución, otorgan las autorizaciones o permisos para el uso y aprovechamiento económico del agua como también en el tema de caudales ecológicos. Estas, además, deberían coordinar con las direcciones provinciales del MAE (Ministerio del Medio Ambiente) y los gobiernos autónomos descentralizados (GAD) ya que son quienes tienen competencias desconcentradas en la materia.

Por mandato constitucional se ordena a que haya coordinación entre la SENAGUA y el MAE en los temas relativos al agua y se rige por la Ley de Gestión Ambiental –codificada en el 2004- y sus reglamentos y normas técnicas contempladas en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) del MAE.

Para el otorgamiento de licencias ambientales es el MAE quien tiene la competencia para emitir las licencias ambientales previa realización de estudio de impacto ambiental y un plan de manejo ambiental. El Acuerdo Ministerial No. 155 del MAE le da la competencia al Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), como autoridad ambiental de aplicación responsable para emitir licencias ambientales para temas hidroeléctricos.

El Código Orgánico de Ordenamiento Territorial de Autonomía Descentralizada, (COOTAD), aprobado en el 2010, siguiendo lo establecido en la Constitución otorga competencias descentralizadas a los Gobiernos autónomos descentralizados (GAD). Se otorgan las competencias a los GAD de la siguiente manera:

- Gobiernos autónomos regionales, (que no existen todavía), la planificación y gestión de cuencas hidrográficas y ordenamiento territorial.

- Gobiernos provinciales, la operación de sistemas de riego e infraestructura, así como la planificación y ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas.
- A los municipios se le otorgan servicios de agua potable

Todo esto basado en los parámetros y normativas que la SENAGUA emita para dicho efecto y en coordinación técnica con el MAE.

1.4.1.2. Instituciones encargadas en el Ecuador de la regulación de caudales ecológicos

Organismos Ecuatorianos

- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE)
- Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)
- Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC)

Organismos Internacionales

- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)
- Asociación Mundial del Agua (GWP)

1.4.1.3. Marco legal en el Ecuador para la regulación de caudales ecológicos

De acuerdo con la gestión sectorizada del agua en el Acuerdo Ministerial No.155 (R.O. 41 del 14 de marzo de 2007). Se define al caudal ecológico como el porcentaje de agua que debe circular en un río, como norma técnica ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental, emitido por el Ministerio del Ambiente (MAE.) y como norma técnica para controlar los impactos ambientales producidos por la construcción de las hidroeléctricas. Este índice señala que el caudal ecológico debe ser el 10% del caudal mínimo promedio anual, tema el cual estará sujeto a revisión debido a la metodología usada y a la falta de un análisis más determinístico, incluyendo no sólo el estudio del río sino también de la cuenca hidrográfica, la biodiversidad y el entorno socio-económico de la localidad.

Un enfoque más claro para resumir la finalidad de caudal ecológico sería el de tener ríos que garanticen la existencia de los ecosistemas acuáticos. Tal motivo nos lleva a que un correcto manejo de gestión de un caudal ecológico sería el que garantice las necesidades ecológicas del agua y a su vez el uso para el cual ha sido programado como hidroeléctricas, sistemas de agua potable, irrigación etc.

En el decreto ejecutivo 1088 del año (2008) se crea la SENAGUA otorgándole las competencias que eran del ex Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) y las correspondientes a la Ley de Aguas de (1973) y su reglamento de aplicación (codificación 2004-016). Atendiendo el mandato constitucional, se encarga a que la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) en coordinación con el Ministerio de Ambiente (MAE), regule mediante norma expresa el tema de caudales ecológicos. En la Ley de Aguas (Proyecto de Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, aprobada en segundo debate del 19 de abril del 2010 y actualmente espera entrar a consulta pre-legislativa). En esta Ley al caudal ecológico se le pone en tercer orden de prelación y su definición no es clara. Se establece que para toda autorización de uso o aprovechamiento productivo del agua, deberá establecerse el respectivo caudal ecológico.

En la Ley de Minería del 2009 y en su reglamento ambiental se establece que el solicitante de la concesión minera debe obtener la aprobación de la concesión de agua para la fase de exploración avanzada, pero no está obligado a solicitar la determinación del caudal ecológico.

Aquí a continuación se muestran las distintas leyes y normas involucradas en el Ecuador, para el Manejo Integrado de los Recursos Hídricos conjuntamente con la regulación de los Caudales Ecológicos.

Son las siguientes:

- Constitución de la República del Ecuador
- Ley de Gestión Ambiental
- Ley de Aguas
- Sistema Único de Manejo Ambiental
- Código Orgánico de Organización Territorial

CAPÍTULO 2

DEFINICIONES Y CONCEPTOS SOBRE CAUDAL ECOLÓGICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Para la comprensión de los conceptos y definiciones de los caudales ecológicos y ambientales, es necesario entender el régimen hidrológico natural en la cuenca, ya que todo se encuentra relacionado directamente al mismo, a continuación se explicará de una mejor manera, los diferentes tópicos que implica el estudio del régimen hidrológico y su relación con el caudal ecológico.

En este capítulo se citará las diferentes metodologías propuestas por los distintos autores, las cuales de una manera sintetizada se describirán los parámetros para el respectivo cálculo del caudal ecológico, necesario para cumplir con la definición del mismo.

2.1.1. RÉGIMEN HIDROLÓGICO NATURAL

El régimen hidrológico es un proceso clave para sostener la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas, desde un punto de vista ecológico y social, en un ambiente participativo de la sociedad, llevadas a una Gestión Integrada del Recurso Hídrico, aplicados a las diferentes Cuencas Hidrográficas.

Siendo importante su definición, para las distintas prácticas de gestión en la Cuenca relacionadas con el uso del suelo, derechos del agua, control de la contaminación y control de las actividades humanas.

2.1.2. PARÁMETROS A LOS CUALES NO SE LOS TOMARÁ EN CUENTA PARA LA DETERMINACIÓN DE UN CAUDAL ECOLÓGICO Y AMBIENTAL.

- Régimen Natural de un río
- Agua destinada para los bichos
- Cantidad mínima fija del caudal en un río, especialmente en época seca

2.1.3. DIFERENCIA ENTRE CAUDAL ECOLÓGICO Y AMBIENTAL

La diferencia radica en que el CAUDAL ECOLÓGICO es el umbral, por encima del cual la especie se mantiene, mientras que el CAUDAL AMBIENTAL es aquel que se encarga de asegurar las necesidades de las especies además de aquellas fijadas por la sociedad, ligados generalmente a un régimen hidrológico, y no meramente a un único valor de caudal.

2.1.4. OBJETIVOS DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES

- Abarcar los requerimientos necesarios, para mantener el ecosistema en general
- Mantener la biótica acuática y ripiaría
- Maximizar la producción de especies de peces comerciales
- Conservar especies en peligro
- Proteger valores científicos y culturales (Tharme 2003)
- Incorporar los bienes y servicios que provee el sistema, como valor socio-económico.
- Conocer la cantidad de agua, que se puede extraer de un río, sin pasar niveles que degraden el ecosistema.

Aquí se muestran los diferentes significados e idealizaciones de las distintas formas y criterios de la concepción de caudal ecológico y ambiental, como preámbulo para su posterior definición:

2.2. CONCEPTOS GENERALES

2.2.1. CAUDAL ECOLÓGICO

- Caudal mínimo que debe mantenerse en un curso de agua al construir una presa, una captación, o una derivación, de forma que no se alteren las condiciones naturales del biotopo y se garantice el desarrollo de una vida natural igual a la que existía anteriormente (Ritcher 1977).
- Cantidad de agua que debe dejarse en el río, para mantener los recursos acuáticos en un determinado nivel. (Riaser 1989).
- Agua que se deja en el sistema de un río, o se libera con un fin de gestión específico vinculado con las condiciones del ecosistema (Brown & King 2003)
- Cantidad o volumen de agua, por tiempo requerido, para mantener la salud del río en un estado en particular, predeterminado o acordado en base a compensar otras consideraciones. (Acrenan & Dunbar 2004).
- Agua que se deja correr en un ecosistema fluvial o el caudal que se libra dentro de él, con el propósito específico de manejar la condición del ecosistema. (Dyson, 2003; Tharme, 2003; Arthington, 2006).
- Cantidad de agua suficiente que circula en un cauce en condiciones óptimas, que permitan el desenvolvimiento natural de la vida bio – acuática y los ecosistemas aledaños (Constitución de la República del Ecuador, Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, 2010)
- Caudal que se estudia y se analiza de acuerdo al hábitat biológico que circunda por el río y sus alrededores, para que este pueda asegurar el mantenimiento futuro de las especies biológicas en el momento de efectuar un proyecto, que requiera captar un porcentaje de agua. (CEDA, Verónica Arias, Marzo 2012).
- Es la cantidad de agua necesaria que debe existir en un determinado cuerpo de agua para garantizar su funcionalidad eco sistémica. Es decir, que la dinámica ecológica de un ecosistema se mantenga en equilibrio, tanto en composición y estructura de especies, como en condiciones hidrológicas, facilitando de esta manera la disponibilidad de condiciones

físicas del hábitat para el adecuado crecimiento y desarrollo de las especies que dependen del cuerpo de agua para cumplir su ciclo vital (Terneus E).

2.2.2. CAUDAL AMBIENTAL

- Régimen hidrológico dado a un río, humedal o zona costera, para mantener los ecosistemas y beneficios, que garanticen la disponibilidad de agua, conjuntamente con las aguas subterráneas. (UICN 2003).
- Niveles del régimen hidrológico, gestionados para mantener la biota del río, los bienes y servicios valorados socialmente, asociados al ecosistema (Ritcher 1977)
- Cantidad de régimen hidrológico original de un río, que debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia las planicies de inundación, para mantener valores característicos específicos del ecosistema (Therme 2003)
- Cantidad, régimen y calidad del caudal necesario que se requiere para sostener los ecosistemas acuáticos (Declaración de Bisbarne 2007)
- Cantidad, periodicidad y calidad del caudal de agua, que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarios y el bienestar humano, que depende de estos ecosistemas (Declaración de Bisbarne 2007).
- Provisión de agua necesaria para mantener la integridad, productividad, servicios y beneficios de los ecosistemas acuáticos, particularmente cuando se encuentra sujeta a regulación de caudal y alta competencia, debido a la existencia de múltiples usuarios. (Bunn & Arthington, 2002; King, 2003; Tharme, 2003).
- Aquel determinado por encima del caudal ecológico, que fija un umbral mínimo y máximo, destinado a la satisfacción de las necesidades establecidas por la sociedad. (Gaviño, 2007).
- Aquel que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que el cauce contiene en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural (riqueza de flora y fauna) y funciones ambientales tales como: purificación de aguas,

amortiguación de extremos hidrológicos, recreación, pesca, entre otros (Davis y Hirji 1999).

- Régimen hidrológico que se establece en un cuerpo de agua, como una alternativa que busca encontrar un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural (flora y fauna), y todas las funciones ambientales, cuya presencia contribuye a la sostenibilidad socioeconómica de los usuarios del recurso. (Terneus E).

2.3. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL CAUDAL ECOLÓGICO

La aplicación del método y el resultado a obtenerse deberán ser específicos, respectivamente, para cada cauce o tramo de cauce en concreto, evitando planteamientos basados en proporcionalidades fijas. La información que cada cauce aporta sobre las necesidades de sus comunidades naturales, deberán ser evaluadas a profundidad.

Los resultados obtenidos deberán estar en línea con experiencias empíricas, tanto bibliográficas como personales, y con los condicionantes propios de los aprovechamientos hídricos ordinarios sobre regulación y/o derivación de caudales. A pesar de la enorme variedad de métodos de cálculo existentes, los resultados obtenibles de todos ellos siguen una distribución más o menos normal que encierra el intervalo de máxima probabilidad entre el 10% y el 30% del caudal medio interanual. Se trata de que el método adoptado mantenga también como intervalo más probable el indicado, a fin y efecto de intentar representar un equilibrio racional entre la conservación de los ambientes fluviales y el aprovechamiento del agua como recurso.

2.3.1. CONDICIONES DE SERVICIO DE UN CAUDAL ECOLÓGICO:

Los organismos acuáticos (peces, invertebrados, plantas acuáticas.) necesitan para desarrollarse adecuadamente un caudal de agua mínimo, denominado también caudal ecológico, el cual debe variar a lo largo del año, naturalmente y sin sobresaltos, o tratando de procurar a lo antes mencionado, denominándose a este régimen anual, **régimen ecológico**.

2.3.1.1. Etapas del régimen ecológico:

De una manera general y sintetizada, un régimen ecológico necesita realizar las siguientes etapas, para un comportamiento ideal y con esto garantizar el régimen natural o estable y sin sobresaltos, ya nombrado anteriormente:

- Valoración de los requerimientos ecológicos de las especies afectadas
- Cuantificación del hábitat disponible para estas especies en diferentes regímenes hidrológicos
- Modelización matemática de la idoneidad de cada régimen hidrológico
- Selección del caudal o régimen ecológico

Parámetros para la cuantificación del hábitat disponible

- Anchura de la localidad o sitio de estudio
- Profundidad media de la localidad o sitio de estudio

2.4. METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA DETERMINACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

Estos métodos servirán para definir el caudal mínimo necesario, para que dicho caudal sea considerado como ambiental, a continuación se mostrarán los más comunes o utilizados a nivel mundial.

Donde entre los métodos más complejos se tendrán los siguientes:

- Hidrológicos
- Hidráulicos
- Simulación de hábitat
- Holísticos

Los cuales dependerán del tramo del cauce en el que se adopte, no siendo siempre aplicables a una escala regional.

TABLA 2.1 RESUMEN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

METODOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	VARIABLES PRINCIPALES A TOMARSE EN CUENTA	METODOLOGÍAS EMPLEADAS
Hidrológica	Se caracterizará por realizar un análisis de series temporales de los caudales naturales del curso de agua, tomándose en cuenta los registros históricos de caudal, tomándose al caudal ecológico como un porcentaje del caudal medio anual.	Único valor de caudal para todo el año. Un valor de caudal para cada mes del año. Régimen completo de caudales ambientales.	Método de Montana Método de Frasser Método “7QX” Porcentajes de excedencia Método NGPRP Método ABF Método RVA
Hidráulica	Tendrá como finalidad relacionar las diferentes variables hidráulicas con los distintos tipos de hábitats presentes en los ecosistemas acuáticos, para el posterior cálculo del caudal ecológico.	Velocidad Profundidad Perímetro Mojado	Método de Múltiples transeptos Método del perímetro mojado Método de Idaho Método R2 Cross
Simulación de hábitat	Se encontrarán basados en datos de respuesta hidrológica, hidráulica y biológica. El caudal ecológico será estimado en base a curvas de descarga del hábitat, tiempo de hábitat y series de excedencia, requiriéndose de una buena información batimétrica y topográfica del curso de agua.	Caudal Hábitat Biotipo	Modelo PHABSIM
Holística	Se encargarán de incorporar modelos de simulación hidrológica, hidráulica y de hábitat, contemplando los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, con información económica y social del sector a ser estudiado y analizado.	Componentes Bióticos y abióticos del ecosistema acuático Régimen hidrológico Información económica y social del sitio Parámetros hidráulicos	DRIFT Bloques de Construcción

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

2.4.1. HIDROLÓGICO:

Esta metodología nos permite tener un análisis más simplificado de la estimación y determinación de caudales ambientales, donde la disponibilidad de información es muy necesaria, además de la veracidad o calidad de esta.

Se tiene como objetivo principal, realizar un análisis de información de series temporales, de caudales naturales del curso de agua, las cuales serán explicadas brevemente a continuación:

Series Temporales

- Registro histórico en estaciones de aforos
- Regionalización hidrológica
- Modelación numérica hidrológica - hidrodinámica

2.4.1.1. Características generales

- Registros históricos de caudal
- Caudal ecológico, como un porcentaje del caudal anual medio

2.4.1.2. Métodos hidrológicos en función del tipo de régimen hidrológico

Se basan en tres propuestas citadas a continuación:

a) Un único valor de caudal para todo el año

- Porcentaje del caudal medio anual (Método de Montana , Tennant)
- Curva de permanencia de caudales diarios (Método de Hoppe)
- Fijado en forma proporcional al Área de la Cuenca (Método de Robinson, Stalnker y Arnette)
- Caudal mínimo semanal asociado a un período de retorno (Métodos “7Q” y Pyrcce)

b) Un valor de caudal para cada mes del año

- Como un porcentaje no constante, del caudal medio mensual
- Como función de la curva de permanencia de caudales diarios para cada mes del año (Método NGPRP)

c) Como un régimen completo de caudales ambientales

- Método de aproximación de rangos de variabilidad (RVA)

2.4.1.3. Aplicaciones de metodologías hidrológicas utilizadas actualmente:

Aquí se citará algunas de las metodologías utilizadas en algunos países en el mundo, basándose especialmente en países de América del Sur y unos pocos de América Central, los cuales tienen condiciones similares a las de nuestro país. En ellas se detalla los respectivos análisis, estudios y niveles de eficiencia en su aplicación.

Las distintas metodologías a utilizarse, se deberán a las características de los ríos y los problemas de gestión del recurso hídrico, en base al desarrollo de tecnologías propias y las restricciones legales, que condicionarán el método a ser utilizado.

2.4.1.3.1. Método Montana

Propuesto por Tennant en 1996 y desarrollado en Estados Unidos, analizado en 11 ríos de dicho país.

El método de Montana es uno de los más usados en el mundo y se aplica a proyectos que no tienen estructuras de regulación como represas, diques u otras modificaciones en el cauce. Este método se desarrolló observando una especie biológica en particular (la Trucha) encontrando relación entre los parámetros físicos del río y el hábitat en la que se podría desenvolver una especie en particular. El método divide el año en dos períodos y se selecciona un porcentaje del caudal medio interanual para cada uno de los 2 semestres, eliminando en sí todo rastro de variabilidad temporal.

Descripción del método

- Caudal Ambiental entre el 10 y 30% del caudal medio anual
 - 10% : Umbral mínimo para organismos acuáticos
 - 30%: Rango bueno y óptimo para organismos acuáticos
- Asume los siguientes parámetros hidráulicos:
 - Ancho del cauce

- Velocidad del agua
- Profundidad
- Se considera que el flujo es estable cuando se cumple la condición: $Q > 10 \% Q_{\text{medio}}$.

TABLA 2.2 ESTIMACIONES DEL CAUDAL AMBIENTAL POR EL MÉTODO MONTANA.

DESCRIPCIÓN CAUDALES	DE	RÉGIMENES DE CAUDALES RECOMENDADOS	
		ESTACIÓN LLUVIOSA	ESTACIÓN SECA
Máximo		200 % del caudal medio	200 % del caudal medio
Rango óptimo		60 - 100 % del caudal medio	60 – 100 % del caudal medio
Sobresaliente		40 %	60 %
Excelente		30 %	50 %
Bueno		20 %	40 %
Justo o degradante		10 %	30 %
Pobre o mínimo		10 %	10 %
Grave degradación		10 %	10 %

Fuente: Donald L. Tennant, Prescripción de régimen de caudales ecológicos para peces, fauna, recreación y demás relacionados con los recursos medio ambientales, Presentación Jay O' Keeffe, UICN Sur, Marco Aguirre, Vallenar, 26 de Julio del 2011

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

2.4.1.3.2. Método de Frasser:

Propuesto por Frasser en 1978.

a) Descripción del método

- Incorpora las mismas variables del método de Montana
- Incorpora una nueva variable, la variabilidad estacional
- Los caudales mínimos mensuales, son un porcentaje del ciclo medio anual de escurrimiento.

b) Recomendaciones para su aplicación:

- Aplicable únicamente a ríos de montaña sin intervención humana, pudiendo conducir a resultados erróneos, si se aplica a otro tipo de río, en distintas condiciones.
- Para su aplicación correcta, se debe realizar una adaptación adecuada al contexto regional, donde se evalúen las distintas condiciones de hábitat de las especies dominantes en el río y en condiciones propias.

2.4.1.3.3. Método “7QX”

a) Características generales

- El caudal ambiental, es tomado como el caudal mínimo promedio con duración de 7 días y período de retorno de X años.
- El más utilizado es el 7Q10 generalmente para la regulación y dilución de contaminantes en ríos, pero lamentablemente no se encuentra diseñado para la protección del hábitat o especies.

b) Descripción del método

- Se necesita de una disponibilidad de una serie de caudales diarios
- Se realiza un ajuste de la distribución a un valor extremo de caudales mínimos (7 días).
- El ajuste de la destrucción en muchos se ha modificado a 30 y 90 días, dependiendo de su aplicación y del caso, esto fue propuesto recientemente por Pyrcce en el 2004.

2.4.1.3.4. Porcentajes de excedencia:

Este método de cálculo se basa, en la consideración del caudal ambiental como un porcentaje de excedencia del mismo.

Descripción del método

- El caudal ambiental se calcula a través de curvas de excedencia
- Las curvas de excedencia se las calcula por medio de una distribución de frecuencias acumuladas, como porcentaje del tiempo en el que, un caudal específico es igualado o superado durante un período de tiempo (día, mes o año).
- Los caudales mínimos son tomados como los percentiles Q95 y Q90
- Hoppe en base a los siguientes percentiles del caudal, aseguró las distintos parámetros de seguridad nombrados a continuación:
 - Q17: Asegura la regulación del cauce
 - Q40: Asegura la reproducción de peces
 - Q80: Asegura la alimentación y refugio de peces

2.4.1.3.5. *Método NGPRP: (USA – Northern Great Plains Resource Program)*

Desarrollado en Estados Unidos, se basa en la metodología de porcentajes de excedencia descrita anteriormente donde:

- El caudal ambiental se determina para cada mes del año, por medio del Q90 de la curva de excedencia de cada mes, de forma independiente, para cada caso.
- Se descarta los caudales extremos secos y húmedos, a excepción de los meses donde se tiene el caudal más elevado, en el cual el caudal mínimo debe corresponder al caudal del 50% del tiempo.
- El caudal ambiental es tomado como un ciclo anual de caudales mínimos

2.4.1.3.6. *Método ABF:*

Denominado “Aquatic Base Flow”, en español “Caudal Base Acuático”, establecido por las agencias de recursos hídricos de Nueva Inglaterra en Estados Unidos.

Características generales

- Utilizado básicamente para los proyectos de energía hidroeléctrica
- El caudal ambiental se lo toma, como la media aritmética de los valores de la media calculada para los caudales medios diarios del mes más seco de cada año.

2.4.1.3.7. Método RVA:

Denominado rango de variabilidad, propuesto por Ritcher en 1997 y desarrollado en Estados Unidos.

Características generales

- Los caudales ambientales, son calculados en base a la variabilidad hidrológica natural.
- La serie de parámetros de la metodología, son tomadas en base a los componentes que conforman el régimen hidrológico natural.
- Se fija una serie de parámetros en un rango de variabilidad natural donde se fija para el cálculo o estimación del caudal ambiental los siguientes parámetros:
 - Percentiles 33 y 67 de las respectivas distribuciones de régimen hidrológico
 - Desviación estándar del régimen natural
- Los dos valores siempre deben estar por debajo del caudal mínimo, este caudal depende del propósito y caso del proyecto a estudiarse.

2.4.2. HIDRÁULICA:

Este método tiene como finalidad relacionar las diferentes variables hidráulicas con los distintos tipos de hábitats presentes en los ecosistemas acuáticos, para el cálculo posterior del caudal ecológico.

2.4.2.1. Objetivos generales

Este método tuvo como finalidad u objetivo general, recomendar las necesidades de un caudal parcial, basado en especies piscícolas de los Estados Unidos.

2.4.2.2. Características generales:

- Modelar la hidráulica como función del caudal
- Relacionar nexos entre la hidráulica y la disponibilidad del hábitat
- Involucrar el conocimiento de parámetros hidráulicos:
 - Velocidad
 - Profundidad
 - Perímetro Mojado

2.4.2.3. Criterios para determinar los requerimientos mínimos del caudal ambiental

- Perímetro mojado, el cual incrementará al aumentar el caudal (punto de inflexión – umbral del caudal mínimo).
- Porcentaje de reserva del hábitat, como porcentaje del perímetro mojado, con un determinado valor de caudal (caudal medio).

2.4.2.4. Aplicaciones de metodologías hidráulicas utilizadas actualmente:

a) Método de múltiples transeptos

Propuesto por Richardson B.A., en el año 1986.

Características generales:

- Usa varias secciones transversales del río
- Se toma mediciones de velocidad, nivel, sustrato y cobertura a diferentes caudales y en diferentes secciones transversales.
- Por medio de simulación hidráulica, se determina las variables de habitabilidad con cambios de caudal.

b) Método del perímetro mojado

Propuesto por Reiser en 1989, como uno de los más comunes y aplicados actualmente, especialmente en Estados Unidos.

Características generales

- La integridad de un hábitat fluvial se encuentra directamente asociado con el área del hábitat mojado, buscando una superficie piscícola útil, con la garantía de la circulación del caudal periódicamente.
- Definición de la superficie útil, como el punto de inflexión de la gráfica del caudal en función del perímetro mojado (Caudal Ambiental).
- El problema radica en la irregularidad que se presenta en los lechos o riberas, donde por lo general se presentan muchos puntos de inflexión.
- Se supone que el perímetro mojado es un sustituto de muchos otros factores o procesos que determinan la integridad ecológica y salud acuática de todo el flujo de agua.

c) Método de Idaho

Características generales

- Establece referentes como: rango de velocidad y profundidad mínima para diferentes especies.
- El caudal mínimo es el que cumple con las exigencias de rango de velocidad y profundidad mínima.
- En base al caudal mínimo, se establece un valor base en el cual se recomienda, 1 o más caudales ecológicos dependiendo de la complejidad del sitio de estudio.

d) Método R2 Cross

Características generales

Establece requerimientos de caudal ambiental, para la protección del hábitat a partir de tres requerimientos fundamentales:

- Profundidad media
- Perímetro mojado (%)
- Velocidad media

2.4.3. METODOLOGÍAS ECO – HIDRÁULICAS O DE SIMULACIÓN DE HÁBITAT

2.4.3.1. Características generales

- Se encuentran basados en datos de respuesta hidrológica, hidráulica y biológica.
- El caudal ecológico es estimado en base a las curvas de descarga del hábitat, tiempo del hábitat y series de excedencia.
- Se requiere información batimétrica y topográficos del curso de agua

- Se necesita una buena cantidad de información ecológica, además de su veracidad de datos.

2.4.3.2. Parámetros utilizados

- Caudal
- Hábitat
- Biotipo

2.4.3.3. Aplicaciones de las metodologías de simulación de hábitat usadas actualmente:

2.4.3.3.1. Modelo PHABSIM:

Denominado “Physical Habitat Simulation Model”, en español “Modelo de Simulación Física del Hábitat”, propuesto por Bovee en 1986. Actualmente este tipo de metodológica es una de las más usadas, para la estimación de caudales ambientales.

a) Características generales

- Permite predecir los cambios en el micro hábitat físico con los diferentes cambios de caudales.
- Acopla modelos biológicos e hidrológicos, donde se puede evaluar los cambios de las comunidades biológicas, conjuntamente con la modificación de las condiciones hidrológicas.

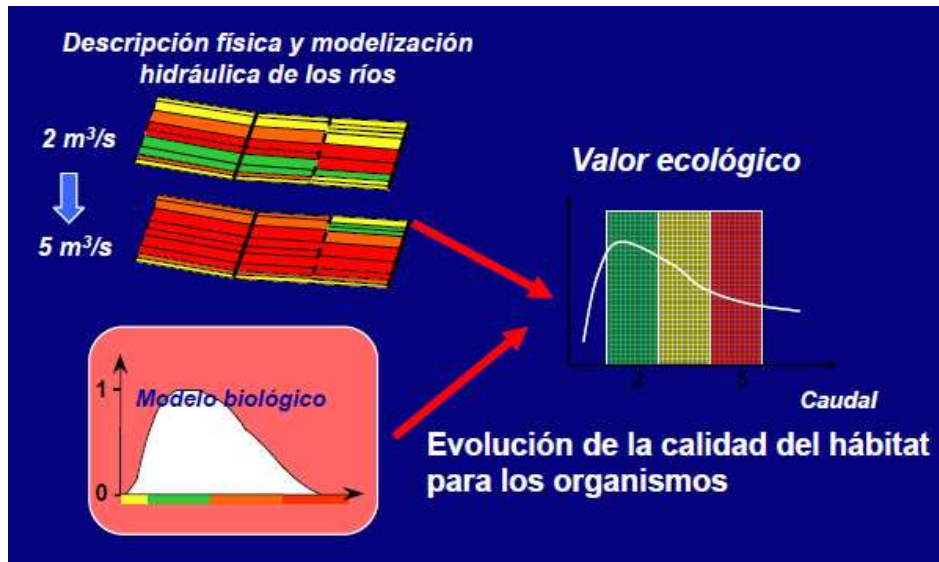
b) Modelos biológicos

Se basan en la ecología de organismos indicadores como: Macro – invertebrados acuáticos y peces.

Donde se utilizan datos ecológicos en dos tipos de valores nombrados a continuación:

- a. Valor local: Aquí se hace una adaptación del modelo para cada caso
- b. Valores regionales: Uno para cada región

FIGURA 2.1 PROCESO DEL MODELO PHABSIM



Fuente: Presentación Marc Pouilly

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

c) *Ventajas del modelo PHABSIM*

- A diferencia de las otras metodologías incluye la parte biológica
- Evalúa la integridad ecológica
- Cuantifica la parte ecológica, para los distintos escenarios de gestión
- Incluye un análisis integral

2.4.3.3.2. *Modelo IFIM:*

Denominado "Instream Flow Incremental Methodology", en español "Metodología de Incrementos de Caudal Ambiental".

a) *Características generales*

- Esta metodología se basa en la variabilidad de hábitat real útil en el tiempo y espacio, determinada en base a los siguientes criterios:
- Modelación hidrodinámica de un tramo representativo del curso de agua, para un rango definido de caudal, conocidos los valores de profundidad y velocidad de agua.
- Curvas de preferencia de hábitat de las especies, en función de la profundidad, velocidad del agua y sustrato, para diferentes estados de desarrollo: fresa, alevín, juvenil y adulto.
- Determinación del hábitat potencial útil asociada a cada especie, a partir de la siguiente expresión:

$$HPU = \sum P_i * A_i \quad (2.1)$$

A_i : Área de cada celda

P_i : Media aritmética o geométrica de los niveles de preferencia de cada especie analizada o indicada.

- Para la obtención de las curvas de hábitat potencial útil, estas deben estar en función del caudal circulante para cada especie en la gráfica del hábitat potencial útil.
- Obtención de las curvas de hábitat real útil en función del caudal circulante para cada especie, ajustando las curvas de hábitat potencial útil para las categorías: juvenil, alevín y fresa, a través de las expresiones formuladas por Bovee en 1982, de tal manera para que luego sean comparadas con el régimen adulto, tal como se muestra a continuación:
 - Adulto/Juvenil = 1/0.8
 - Adulto/Alevín = 1/0.3
 - Adulto/Fresa = 1/0.2

Donde a continuación, se determina para cada especie, el estado de desarrollo más limitante o de menor hábitat disponible, por medio de las expresiones indicadas anteriormente.

- El caudal mínimo necesario para la conservación del ecosistema, es el correspondiente al punto de inflexión de la curva de la especie más comprometida, donde se recomienda mantener al menos el 50% y no sobrepasar el 80% del hábitat potencial.
- Establecido el caudal mínimo, se establece el régimen anual del caudal ambiental, el cual se obtiene validando y ajustando el valor obtenido, en función de los resultados de régimen anual obtenido a partir del método hidrológico.

2.4.4. METODOLOGÍAS HOLÍSTICAS

2.4.4.1. Instituciones involucradas

Hay cuatro instituciones a nivel mundial, encargadas del uso y manejo de dicha metodología, las cuales son:

- WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza)
- TNC (Conservación de la Naturaleza)
- IRF (Fundación Internacional de los ríos)
- BC (Banco Mundial)

2.4.4.2. Características

- Estas metodologías, con sus respectivos modelos, se encargan de incorporar modelos de simulación hidrológica, hidráulica y de hábitat, es la única metodología que para el cálculo del caudal ambiental, adopta un enfoque holístico, basado en los diferentes tipos de ecosistemas.
- El manejo debe contemplar todos los factores biológicos, abióticos y el espectro completo del régimen hidrológico, incluyendo tanto su variabilidad espacial como temporal.

- Su complejidad de aplicación es muy variable
- Tiene una gran flexibilidad para adaptarse a los diferentes casos de la realidad
- Son interdisciplinarias, donde cada especialista aplica metodologías específicas, para mantener la relación entre el régimen hidrológico y los componentes del ecosistema, para luego interactuar con otros especialistas, relacionando las diferentes variables entre sí, teniendo como resultado una descripción de un régimen hidrológico necesario para mantener determinada condición del ecosistema.
- Se basa en la evolución del ecosistema en su conjunto, y no como en las metodologías anteriores en una o pocas especies.
- Se consideran los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, donde se incluye la geomorfología, hidráulica, calidad del agua, vegetación acuática, macro invertebrados, peces y otras comunidades vinculadas al ecosistema.
- Estas metodologías fueron desarrolladas mayormente en Australia (Tharme, 2003) y Sudáfrica (King, 2003).
- La metodología de mayor uso o aplicación utilizada es el DRIFT
- Requiere información extensa y de muy alta calidad, con información del ecosistema y la biota acuática, donde además también se utiliza información económica y social del sector involucrado o de estudio.

2.4.4.3. Aplicaciones de las metodologías holísticas usadas actualmente:

2.4.4.3.1. IFIM:

Denominada “Metodología Incremental para la Asignación de Caudales”, propuesta por Bovee en 1986, muy aplicada y usada en los Estados Unidos, además hasta ahora es una de las mejores fundamentadas, es decir con mayores fundamentos.

2.4.4.3.2. DRIFT:

Denominada “Metodologías de Respuesta Aguas Abajo a la Transformación Impuesta de Caudales”, propuesta por King en el 2003, desarrollada en Sudáfrica, siendo la última metodología holística desarrollada últimamente.

a) Aspectos o variables utilizadas

Se tiene cuatro módulos o variables, que implican el estudio de esta metodología, las cuales son:

- Biofísico
- Sociológico
- Desarrollo de escenarios
- Económico

1) BIOFÍSICO

Este aspecto se encarga de abordar la descripción de la naturaleza y el funcionamiento del río, aquí se establecen las bases para predecir los cambios relacionados a las diferentes modificaciones de caudal

2) SOCIOLÓGICO

Aquí se identifica la población en riesgo, describiendo los distintos usos del río, perfiles de salud, para luego desarrollar las distintas bases, para predecir los diferentes impactos sociales presentados por los distintos cambios presentados en el río.

3) DESARROLLO DE ESCENARIOS

Se identifica escenarios posibles, describiendo las consecuencias potenciales presentadas en los mismos, tanto a nivel ecológico, social y económico.

4) ECONÓMICO

Se calcula los costos de compensación y mitigación, de los impactos de la población en riesgo para cada escenario, teniendo como resultado una serie de escenarios, para una buena toma de decisiones.

Características generales:

Evalúa los riesgos de impacto ambiental, a partir de la evaluación de la regulación de los ríos a nivel de la cuenca.

2.4.4.3.3. Bloques de construcción (BBM):

Denominada, método de los bloques de construcción (Building Block Methodology-BBM), desarrollada en Sudáfrica por King en el año 2000.

Esta metodología se ha desarrollado bajo la premisa básica, de que las especies fluviales, dependen de elementos como, el régimen del caudal, componentes del ecosistema y beneficios económicos, siendo áreas de interés científico, donde luego el estudio de los diferentes componentes se realiza en conjunto, con expertos en hidrogeología, geomorfología, bioquímica etc.

Características generales

- Realiza un enfoque prescriptivo
- Se encarga de construir un régimen de flujo, para mantener al río en condiciones predeterminadas anteriormente.
- Bajo el régimen del caudal, se obtiene los caudales mínimos e inundaciones, conservando la dinámica de sedimentos y la estructura geomorfológica del río.
- Se combinan los diferentes componentes del ecosistema, para llegar a un consenso en cuanto a los bloques de construcción del régimen de caudal ambiental.
 - Evalúa aspectos hidrológicos, ambientales, sociales y económicos, antes de definir un caudal ambiental.

2.5. EXPERIENCIAS DE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES APLICADAS EN LATINOAMÉRICA

Las distintas metodologías de evaluación de caudales ambientales, en Latinoamérica no han superado todavía la fase de proposición conceptual y metodológica, sin todavía llegar a su fase de ejecución, donde sus prioridades de estudio se encuentran en el orden, citado a continuación:

- Hidrológicos
- Hidráulico
- Simulación de hábitat

Siendo las metodologías holísticas, de muy poco estudio o aplicación

TABLA 2.3 METODOLOGÍAS APLICADAS EN LATINOAMÉRICA

PAÍS	METODOLOGÍA	AUTOR O FUENTE	TIPO DE APLICACIÓN
Argentina	DRIFT	Porcel, 2005	Conceptual
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • 50% o 70%, 7Q10 • 10% del Q90 • 5- 20% del Q90 	Bernetti, 2002	En aplicación
Chile	IFIM	Espinoza	Conceptual
Colombia	Simulación de Hábitat	Diez Hernández & Ruíz Cobo, 2007	Conceptual
	Régimen Ambiental de Caudales	Diez Hernández, 2008	Conceptual
	Recopilación Metodológica	MAVDT, 2008	Conceptual
Costa Rica	Holística	Jiménez, 2005	Conceptual
México	IFIM	Tharme, 2003	Sin especificar
	PHABSIM	García Rodríguez, 1999 Santa Cruz de León & Robledo Aguilar, 2009	Sin especificar
	Holístico	Barrios, 2009	Sin especificar
Panamá	Hidrológicos	UNESCO, 2005	Sin especificar
Uruguay	IAH	Failache & Motta	Conceptual

Fuente: Vida Silvestre Uruguay UICN – Sur, 2002

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

TABLA 2.4 BALANCE GENERAL DE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS.

TIPO DE METODOLOGÍA	DURACIÓN (Meses)	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Hidrológica	½	Bajo costo , rápido de usar	<ul style="list-style-type: none"> ➤ No es específico al sitio. ➤ Se asumen los vínculos ecológicos
Hidráulica	2 a 4	Bajo costo, específico al sitio	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se asumen los vínculos ecológicos
Simulación de Hábitat	6 a 8	Incluye vínculos ecológicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Extensa recopilación de datos. ➤ Uso de expertos ➤ Alto costo
Holístico	12 a 36	Cubre la mayoría de los aspectos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gran conocimiento científico ➤ Costo elevado ➤ Poco operacional

Fuente: Vida Silvestre Uruguay UICN – Sur, 2002

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

CAPÍTULO 3

BASES Y RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS PARA LA CAPTACIÓN Y TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

3.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente capítulo es el de indicar las bases y restricciones características relevantes para diseñar y dimensionar los dispositivos de paso de peces existentes en la teoría y experimentación de varios autores. Estas bases y restricciones consisten en entender los elementos que influyen en la problemática planteada.

En todos estos dispositivos así como en las diferentes contracciones hidráulicas, tienen parámetros físicos actuantes que deben ser analizados y revisados, en el capítulo presente se expondrá un estudio de cada parámetro de las estructuras que afectan a los diferentes dispositivos de paso.

En base a las diferentes tópicos analizados en el capítulo anterior, se ha llegado a la conclusión de que el caudal ecológico es de vital importancia para asegurar la preservación de la vida acuática en el curso natural del río, por lo que será una de las bases principales que rijan las dimensiones del tipo de estructura que transporte este caudal ya que la presente tesis propone las bases de diseño de una estructura que transporte el caudal ecológico. Por consecuencia el concepto de caudal ecológico dice que es el mínimo caudal necesario para asegurar la vida aguas abajo del proyecto, para que se asegure la vida aguas abajo es necesario tener una especie indicadora que nos ayude a determinar si el objetivo de esta definición se está cumpliendo, se tomará al pez como organismo acuático indicador para el diseño y dimensionamiento de los diferentes dispositivos propuestos para transportar el caudal ecológico y mantener la vida en el río.

3.2. ECOSISTEMAS Y TRANSPORTE DE CAUDAL ECOLÓGICO

La combinación de diferentes condiciones climáticas geofísicas, y otros factores abióticos tienen una influencia decisiva en la estructura para el transporte del caudal ecológico, así como en la calidad de los hábitats existentes dentro de un río.

Posteriormente se describen algunas de estos parámetros fundamentales

3.2.1. GEOLOGÍA Y CLIMA

En las denominadas regiones ecológicas como en las tierras bajas cercanas a las costas, las tierras altas y las regiones andinas difieren en su geología y clima por lo que el comportamiento de los flujos de los ríos difieren significativamente.

Las características hidrológicas y las propiedades hidroquímicas se encuentran relacionadas por parámetros como la altura, precipitación, y la composición del afloramiento de rocas. La pendiente del terreno tiene un factor orográfico y un efecto directo y decisivo en la velocidad y la velocidad en la composición sustrato de fondo, erosión y sedimentación.

3.2.2. VELOCIDAD DE FLUJO

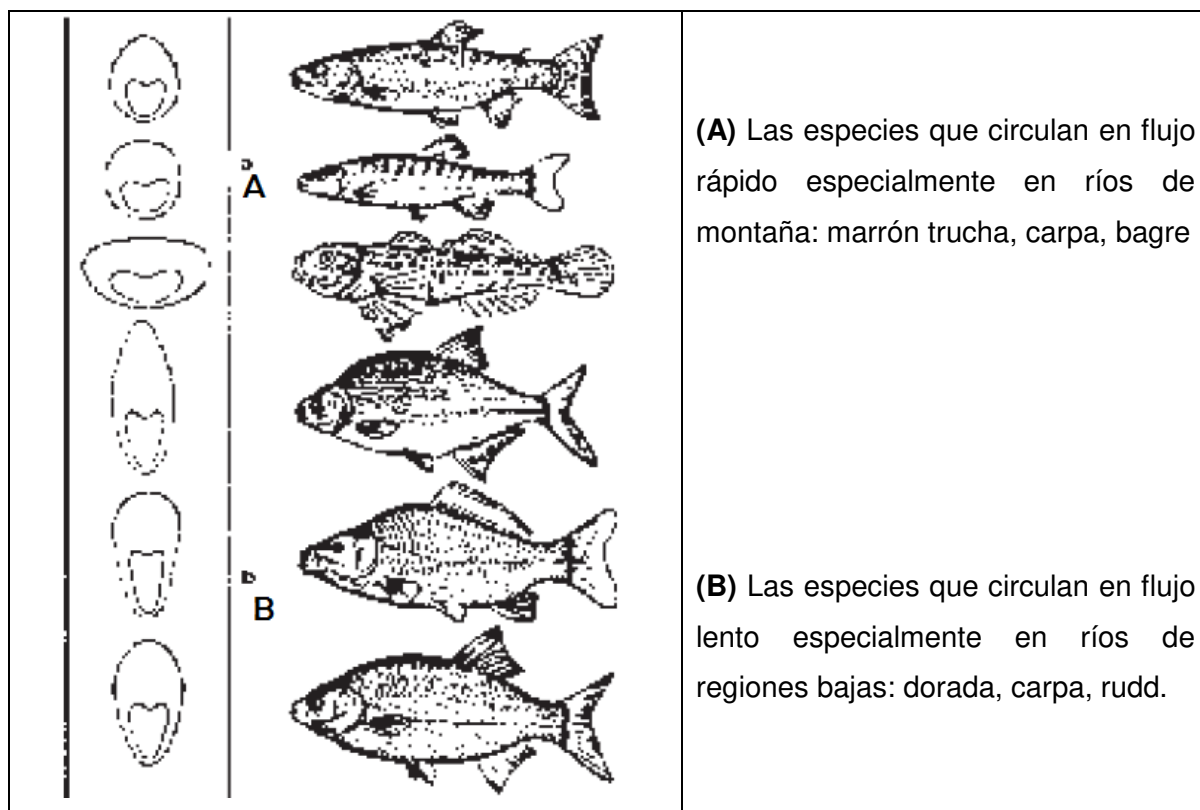
Desde el punto de vista ecológico la velocidad de flujo es un factor muy importante por ejemplo la fauna en el río está en constante peligro de ser arrastrado por el flujo, estos mismos organismos han desarrollado habilidades para poder navegar en contracorriente.

3.2.3. ADAPTACIÓN DE LAS ESPECIES ACUÁTICAS EN LOS RÍOS

Las formas del cuerpo de los peces están perfectamente adaptadas a los regímenes de flujo de sus respectivos hábitats como por ejemplo el Salmón y la trucha pueden saltar obstáculos y romper velocidades de flujos de agua mucho mejor que los *Cyprinus Carpio* los cuales viven en lugares con flujos de aguas más suaves.

Muchas especies utilizan los sustratos de las profundidades como refugio para poder esquivar las velocidades de flujo causadas por crecidas

FIGURA 3.1 ADAPTACIONES DE LAS FORMAS CORPORALES DE LOS PECES A DIFERENTES VELOCIDADES DE FLUJO.



Fuente: Fish Passes, Design Dimensions and monitoring, Rome, 2002, Shua, 1970

3.2.4. TEMPERATURA

La temperatura del agua, es de especial importancia para muchas especies que están adaptadas a un estrecho intervalo de temperatura para sus funciones metabólicas y de comportamiento normal.

Tales especies sólo pueden tolerar un grado limitado de desviación de su temperatura óptima. Incluso un ligero calentamiento de las aguas o una intensa radiación solar puede limitar su reproducción ya que está vinculado a una mínima temperatura que es diferente para cada especie. Mientras que la trucha común (*Salmo trutta* f. *fario*) desova en temperaturas por debajo de 5 ° C, la reproducción de la nase (*Chondrostoma nasus*) sólo se activa en 8 ° C, la reproducción de la carpa (*Phoxinus phoxinus*) es a 11 ° C. Las especies típicas de la tramos

inferiores del río (potamon) como la carpa (*Cyprinus Carpio*) y la tenca (*Tinca tinca*) sólo desovar a temperaturas muy por encima de los 20 ° C.

La temperatura también juega un papel fundamental en el comportamiento migratorio de peces (Jonsson, 1991). El salmón y la trucha prefieren migrar aguas abajo a temperaturas superiores a 10 ° C. La temperatura del agua también provoca la migración aguas arriba del pescado. Sin embargo también, una alta temperatura del agua impide la migración aguas arriba ya que el metabolismo de los peces pueden someterse a imposición y la del pescado y su fuerza física puede ser limitada.

3.2.5. OXÍGENO

El oxígeno disuelto desempeña un papel significativo en el ecosistema acuático. La captación de oxígeno a través de la superficie del agua se puede dar por flujo turbulento, o también es producido por algas planctónicas y epífitas a través del proceso de la fotosíntesis (fuente biológica de oxígeno). La solubilidad del oxígeno depende en gran medida de la temperatura, el oxígeno se disuelve más rápido en temperaturas más altas.

El contenido de oxígeno del agua, que a su vez está estrechamente relacionada con la velocidad del agua ejerce una influencia considerable en la colonización de los organismos acuáticos, ya que estos necesitan una cantidad de oxígeno para sobrevivir y requiere también para desarrollar su capacidad de nado como por ejemplo los (*Cyprinus Carpio*) pueden sobrevivir en las concentraciones de oxígeno de 2 a 3 mg / l. las truchas marrones no pueden tolerar el oxígeno en concentraciones significativamente inferiores a 9 mg / l por largos períodos de tiempo.

3.3. MEDIOS ACUÁTICOS

Los medios acuáticos son hábitats, donde se desarrollan gran cantidad de animales, especies y organismos acuáticos, que se han visto amenazadas y destruidas, por las diferentes actividades antrópicas realizadas por el hombre.

3.3.1. ESPECIES ACUÁTICAS

Los peces que habitan nuestros ecosistemas, se caracterizan de manera general por realizar desplazamientos más o menos largos en todo el año, donde entre las especies más llamativas tenemos al salmón, trucha y anguila, la última no existente en nuestro país, especialmente para ríos de alta montaña, que es nuestro caso de estudio.

3.3.2. MIGRACIÓN Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS PECES

El comportamiento en las migraciones de los diferentes grupos de peces en sí se realiza para satisfacer sus necesidades como por ejemplo, durante su fase de crecimiento, encuentran su hábitat óptimo en zonas con flujos suaves y sustratos de grano fino. Estas condiciones no existen a menudo cerca unas de otras especialmente en aguas que han sido influenciados por actividades antropogénicas lo que da por resultado las migraciones de largas distancias, algunas especies como él (*Chondrostoma nasus*) y el barbo (*Barbus Barbus*) migran hasta 300 Km. (Steinmann, 1937).

A finales del verano diferentes especies de peces se mueven a los hábitats de invierno. Estos generalmente se ubican en los tramos inferiores de los ríos, por tanto tramos con flujos más suaves. Hay peces que bajan hasta el fondo del río, donde realizan su hibernación mientras reducen su metabolismo.

Las migraciones de desove son un tipo especial de migración entre las diferentes partes de la gama de la especie. Si las migraciones de desove están bloqueadas por obstáculos infranqueables, los peces puede desovar en algunas partes del río donde las condiciones son menos adecuadas (desove de emergencia). Esto da como resultado menor reclutamiento o total fracaso de reproducción con eliminación subsiguiente de la especie del hábitat.

3.3.2.1. Aspectos importantes para una buena migración de las especies acuáticas

3.3.2.1.1. Conectividad fluvial

La conectividad fluvial es un aspecto muy importante en la migración, garantizando los siguientes tópicos citados a continuación:

- Garantizar la reproducción de las especies
- Favorecer la recolonización de áreas afectadas por perturbaciones
- Conservación de especies autóctonas, favoreciendo su dispersión y evitando la desfragmentación de las mismas

3.3.2.2. Impactos generados en la fauna de peces debido a la presencia de obstáculos

Para un mejor entendimiento de los diferentes impactos generados en la fauna de los peces y en su migración, se hace de vital importancia entender los diferentes obstáculos que se presentan en su paso, además de una definición que da una concepción adecuada de lo que es realmente un obstáculo.

3.3.2.2.1. Definición de obstáculo

Toda aquella estructura, que genere condiciones hidráulicas en el río incompatibles con las respectivas capacidades de nado y requerimientos biológicos del pez.

3.3.2.2.2. Tipos de obstáculos

Existen varios tipos de estructuras transversales (obstáculos), que condicionan la migración de los peces, entre estos tenemos:

- Presas, generalmente presentan alturas mayores a 10 m (Dique transversal)
- Azudes, generalmente presentan alturas hasta 10 m (Diques transversales)
- Estaciones de Aforo para la medición de caudales
- Vados, construidas con caños de drenaje circular
- Puentes, estructuras diseñadas para paso vehicular

(Observar Anexo N°1)

3.3.2.2.3. Impactos Generados

Los embalses que se generan para el almacenamiento de agua, para su posterior uso para la energía u otros fines, generan importantes modificaciones en la ictiofauna, debida a las alteraciones presentadas en el hábitat, por las siguientes causas:

- Velocidades de flujo
- Pérdidas de variaciones de nivel
- Calidad del Agua
- Sólidos totales disueltos
- Gases disueltos
- Materia Orgánica
- Modificación de parámetros morfo métricos (profundidad y ancho)

Además, para una mejor comprensión, se citará a continuación los diferentes efectos que se producen aguas arriba y abajo del dique transversal.

a) Aguas Arriba

- Aumento de la mortalidad de huevos y larvas, por la disminución de la velocidad del flujo.
- Pérdida del hábitat de desove
- Modificación del proceso migratorio, debido a las diferentes velocidades de flujo generadas.
- Disminución del reclutamiento de especies migratorias
- Mortalidad de peces, por la disminución presentada en la calidad de agua presente en el sitio
- Deterioro de las pesquerías, debido a la disminución presentada de las especies acuáticas.
- Desaparición de refugios contra los depredadores

b) Aguas abajo

- Mortalidad de peces, por la sobresaturación de oxígeno existente
- Mortalidad de peces en el paso, a través de turbinas y vertederos
- Mortalidad de peces, por el incremento de peces, aguas debajo del dique transversal.
- Alteración de los patrones reproductivos y migratorios de las especies acuáticas, debidas a las variaciones diarias de caudal, usadas para la generación de energía eléctrica comúnmente.

- Efecto barrera producido por el dique transversal, limitando los movimientos de dispersión y colonización de las especies, así como también los distintos movimientos migratorios realizados por la especie acuática.

3.4. OBRAS DESTINADAS A LA REHABILITACIÓN DE LA CONECTIVIDAD FLUVIAL DE ESPECIES ACUÁTICAS EN EL MEDIO FLUVIAL

La base teórica para reclamar la integridad y la conexión lineal de los sistemas fluviales, se basará en la alteración y obstrucción de las características de factores abióticos en el curso de un río. Las especies acuáticas se adaptarán a las condiciones de vida específicas que prevalecen en cualquier río y llegan a formar biocenosis características al cambio de una sucesión natural a lo largo del curso de agua. Por este motivo se necesitará restaurar la conectividad fluvial ya que asegura la vida de las especies acuáticas más importantes entre estas el pez, que aparte de ser un organismo acuático predominante es de valor comercial y alimenticio para las poblaciones que viven en los sectores cercanos a los ríos. (Vannote ,1980).

A continuación se describirán las distintas soluciones destinadas a mejorar la conectividad ecológica de especies acuáticas, dentro de la cuenca de un río, se ha centrado dentro de este estudio los peces, ya que es la especie predominante y necesaria para la conservación del medio ecológico, especialmente en el caso de centrales y micro centrales hidroeléctricas que son el caso de estudio de este proyecto.

Entre las soluciones analizadas, estudiadas y aplicadas en algunos casos se tendrán las siguientes:

3.4.1. ELIMINACIÓN DEL OBSTÁCULO

Se utilizará cuando el obstáculo (presa, azud, etc.), no tiene una buena relación con la gestión del agua, donde el objetivo principal consistirá en eliminar el obstáculo, para mejorar los hábitats fluviales.

Actualmente, ha sido realizado en Estados Unidos y en España (Cataluña)

3.4.2. CAPTURA Y TRANSPORTE DE PECES CON CAMIONES

Consiste en atrapar los peces aguas abajo del obstáculo y transportarlos aguas arriba del mismo por medio de camiones cisternas, superando de esta manera el obstáculo y utilizado generalmente en la migración de bajada de los peces.

3.4.3. RÍOS LATERALES

Consiste en la construcción de un vertedero de río lateral, con un canal de tierra o rocoso, con baja pendiente donde se tiene como objetivo imitar un curso fluvial natural, donde además de crear una ruta adecuada para la migración de peces, también se generará un hábitat para la relación entre las distintas especies acuáticas.

Las pendientes generalmente se encontrarán entre:

- 1:30 para tramos medios
- 1:50 para tramos bajos

3.4.4. DISPOSITIVOS DE PASO

Se utilizarán cuando no se dispone de un espacio suficiente en los diferentes obstáculos y condiciones naturales, por lo que se hará necesario plantear una solución para la conectividad fluvial adecuada para peces, por medio de soluciones técnicas adecuadas y establecidas de acuerdo al sitio y a las diferentes condiciones naturales que se encuentre en el medio natural.

Este tipo de estructuras tendrán como objetivo fundamental, salvar la migración de especies acuáticas aguas abajo del obstáculo, garantizando la protección y dirección adecuada de los peces respecto a las diferentes estructuras peligrosas componentes del obstáculo ubicadas aguas abajo del mismo, además de mitigar y disminuir la existencia de barreras, sin la necesidad de una eliminación del obstáculo dado por la estructura.

3.4.4.1.Requisitos generales para los dispositivos de paso de peces

Cuando se realizan obras en los ríos sean estas de aprovechamiento hídrico o de desviación se tendrá que tener en cuenta la continuidad del río, este deberá ser restaurada independientemente de la magnitud del río ya que afectará a los ecosistemas.

Antes de planificar un dispositivo de paso para peces, el primer paso deberá ser el de cuestionar la necesidad de mantener el existente curso natural del río ya que la construcción de un paso de peces es siempre sólo la "segunda mejor solución". Para la restauración de libre paso de peces a través de un río. Se tendrá que tener en cuenta que los dispositivos de paso para peces, algunos de estos no asegurarán que el pez pueda transcurrir con la migración.

Las consideraciones básicas se referirán a las características fundamentales, tales como la ubicación óptima y los criterios de diseño de pasos de peces en un río, que son independiente del tipo particular de paso para peces.

Los criterios generales que deberán cumplir para incluir los dispositivos de paso para peces son los requisitos biológicos y el comportamiento de la migración de los organismos acuáticos, por lo tanto constituyen aspectos importantes en la planificación de pasos de peces.

Se tendrá que tener muy en cuenta las normas generales para incluir diferentes pasos para peces además de aspectos individuales que deberán ser tomados en cuenta en la planificación para la construcción de una nueva presa y en la evaluación de un paso de peces existentes o en la planificación de la instalación de pasos de peces para una presa existente. Estos requisitos deberán tener prioridad sobre la economía. Dependiendo de las circunstancias locales, bien podría ser necesaria la construcción de varios pasos para peces en una presa, para garantizar el paso satisfactorio de todas las especies.

3.4.4.2.Componentes de un dispositivo de paso para peces

- Posición óptima para los dispositivos de paso

- Entrada del dispositivo de paso de peces, flujo de atracción y condiciones de entrada.
- Salida del dispositivo de paso de peces y condiciones de salida
- Caudal y condiciones de flujo en el paso de peces
- Longitudes y dimensiones de un paso para peces

3.4.4.3. Posición óptima para los dispositivos de paso para peces

La migración de organismos acuáticos (peces) están totalmente disponibles en ríos que no han sido represados, las presas y embalses suelen limitar la migración de los organismos a una pequeña parte de la sección transversal del canal llamado paso para peces.

Los pasos de peces serán por lo general estructuras pequeñas en ríos pequeños y de gran tamaño. En la práctica, las dimensiones posibles de cualquier paso para peces serán generalmente, limitadas por la ingeniería hidráulica y las limitaciones económicas, en particular en los grandes ríos, así la posición de un paso para peces en la presa es de importancia crítica.

FIGURA 3.2 VISTA AÉREA DE LA PRESA EN NEEF EN EL RÍO MOSELLE (RENANIA- PALATINADO), PARA MOSTRAR EL TAMAÑO DEL PASO DE LOS PECES (FLECHA) EN COMPARACIÓN CON EL TAMAÑO TOTAL DE LA PRESA.



Fuente: Fish Passes, Design Dimensions and monitoring, Rome, 2002

Los peces e invertebrados acuáticos habitualmente migran aguas arriba en, o a lo largo del flujo principal. Para que la entrada de un paso de peces sea detectado por estos mismos, se deberá ubicar el paso de peces en la posición señalada en la figura. Se tendrá la ventaja de que con una posición cerca de la orilla, el paso de peces puede ser fácilmente vinculado al fondo o sustrato de esta parte del río.

FIGURA 3.3 PUNTOS DE UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO DE PASO

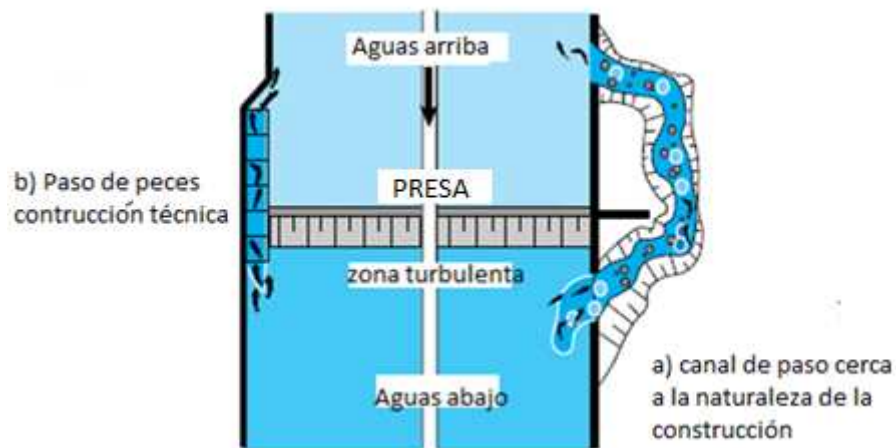


Fuente: Fish Passes, Design Dimensions and monitoring, Rome, 2002

La posición más adecuada para un paso de peces en las centrales hidroeléctricas es generalmente paralela a la dirección del flujo y en una de las orillas del río. La

salida de agua del paso de peces deberá colocarse lo más cerca posible de la salida de la turbina o de una de las compuertas de descarga de la presa, por lo tanto hay que evitar la formación de zonas muertas entre la entrada del paso de peces y la obstrucción debido a que los peces en la migración aguas arriba fácilmente pueden perder la entrada y permanecer atrapados en la zona muerta.

FIGURA 3.4 POSICIÓN ÓPTIMA DE UN CANAL DE DESVIACIÓN Y DE UN PASO TÉCNICO DE PECES.



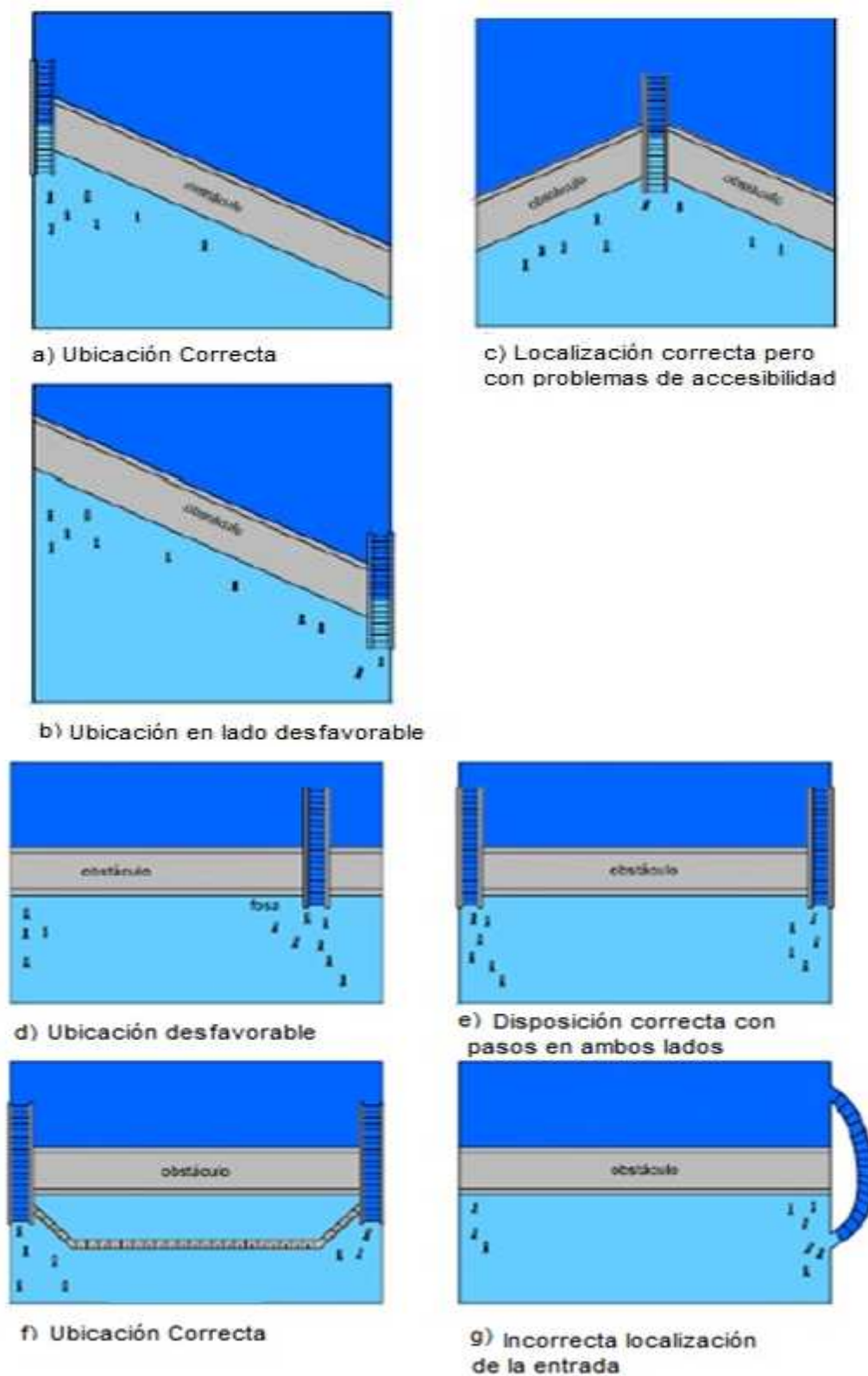
Fuente: Fish Passes, Design Dimensions and monitoring, Rome, 2002

La migración de peces aguas arriba se guían por la dirección del flujo principal y nadan hasta la zona de alta turbulencia aguas abajo directamente debajo de la presa o en la salida de la turbina. En las proximidades de la orilla los peces buscan la forma de seguir avanzando aguas arriba. (LARINIER, 1992).

3.4.4.3.1. Posible ubicación del dispositivo de paso para peces

En base a la experiencia, se ha llegado a determinar que la entrada deberá ubicarse lo más próximo a un punto más elevado, aguas arriba del pie del obstáculo, para asegurar que los peces al encontrar el obstáculo puedan seguir avanzando por cualquier otro camino alternativo existente.

FIGURA 3.5 IMPLANTACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PASO.



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

3.4.4.4. Entrada del paso de peces, flujo de atracción y condiciones de entrada

Asegura la eficacia del dispositivo para que el pez, pueda encontrar la entrada y franquear el dique transversal en su migración aguas arriba del mismo, siendo por esto parte primordial en el diseño de los distintos dispositivos de paso (Clay 1995).

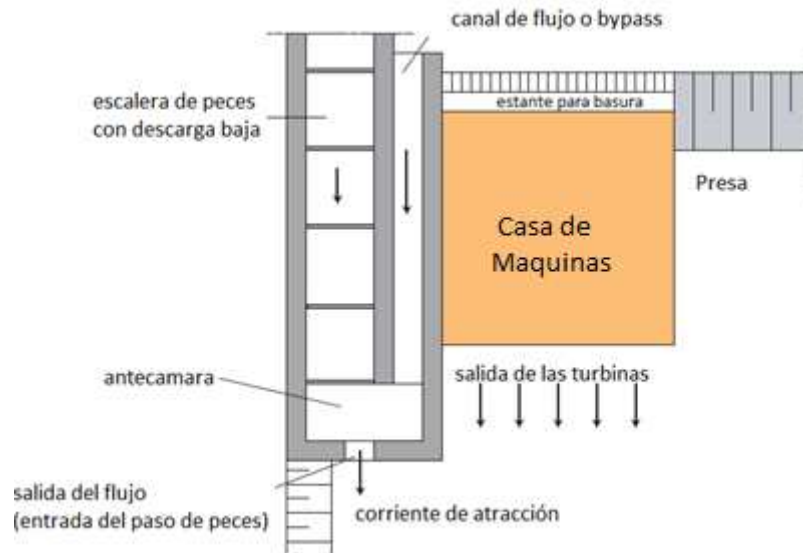
El percibir el flujo de agua a presentarse, es un factor importante que deben tener los peces para poder orientarse por los ríos. Los peces que migran aguas arriba, generalmente son los peces adultos, estos suelen nadar en contracorriente entre los flujos de más alta turbulencia sean que estén ubicados en el centro o en los bordes del río, al encontrar una obstrucción el pez tratará de buscar los lados del dique transversal y al hacerlo estos deberán ser atraídos por la turbulencia de la salida de flujo del paso de peces que se hubiese construido.

Las grandes descargas que se dan debido al exceso de caudal o a los vertederos de descarga producen una gran turbulencia y grandes velocidades aguas abajo después de la obstrucción influyendo en la atracción producida por el flujo en la entrada del paso para peces. De tal forma el paso para peces debe proporcionar un flujo necesario para que se produzca un flujo de atracción uniforme a la salida del paso. La atracción del flujo debe ser perceptible, sobre todo en las zonas de la descarga del paso para peces en esta zona los peces se deben ver obligados a nadar debido a las características de salida del agua. La velocidad a la salida del flujo en la entrada del paso, debe estar dentro del rango de 0,8 a 2,0 m/s (SNIP, 1987), para que el pez pueda nadar en contracorriente.

El uso de un canal de flujo (bypass) desde la cabecera del dique transversal hasta la entrada del paso de peces puede ayudar a incrementar la atracción del flujo en la entrada del paso y esto sería muy útil, ya que ayudaría a intensificar la atracción de los peces.

Otro dispositivo que ayuda a la atracción de peces es una antecámara que se ubicaría en la entrada del paso e incluiría la salida del canal de flujo (bypass), (SNIP, 1987). Observar en la figura 3.6.

FIGURA 3.6 DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA DESCARGA ADICIONAL A TRAVÉS UN BYPASS, PARA AUMENTAR LA ATRACCIÓN DEL FLUJO EN LA ENTRADA DEL PASO DE PECES.



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

La entrada del paso de peces deberá ser ubicada en el lugar donde los peces se concentran en movimiento ascendente.

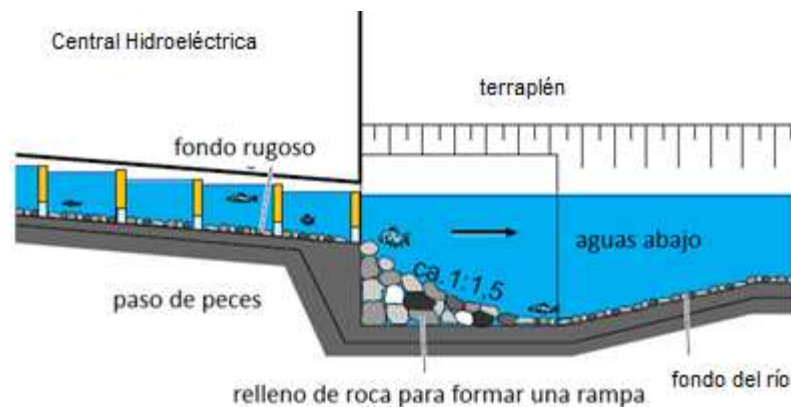
Las características de los flujos de descarga y los detalles estructurales de la obstrucción determinan el área de concentración y esta área en muchos casos está directamente al pie del dique transversal o en el caso de las hidroeléctricas en las salidas de las turbinas. Por lo tanto el tipo de flujo para atraer a los peces debe ser dirigido desde la entrada del paso hacia la zona de concentración de tal manera que los peces al seguir el flujo de agua, encuentren la entrada directamente al paso.

La entrada en lo general se ubicará en dirección paralela a la dirección de flujo del río de esta manera el pez no realizará cambios bruscos de dirección. Si la entrada de la escala de peces está demasiado lejos aguas abajo el pez tendrá dificultades para encontrar la entrada del paso, en estos casos lo más importante para que el pez pueda encontrar la entrada del paso es la atracción producida por el flujo de agua, la cual deberá ser perceptible para los peces en movimiento ascendente, un flujo de atracción adecuada para los peces se puede conseguir aumentando la

velocidad del flujo en el paso de peces o añadiendo una descarga adicional mediante un bypass.

El problema ocasionado por la diferencia de nivel entre el fondo del río y la entrada del paso de peces se puede solucionar creando una rampa de escollera submarina, que pueda unir la entrada con el fondo, esta rampa no puede superar una pendiente mayor a 45°.

FIGURA 3.7 RAMPA DE ESCOLLERA SUBMARINA CONECTADA A LA ENTRADA DEL PASO DE PECES.



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

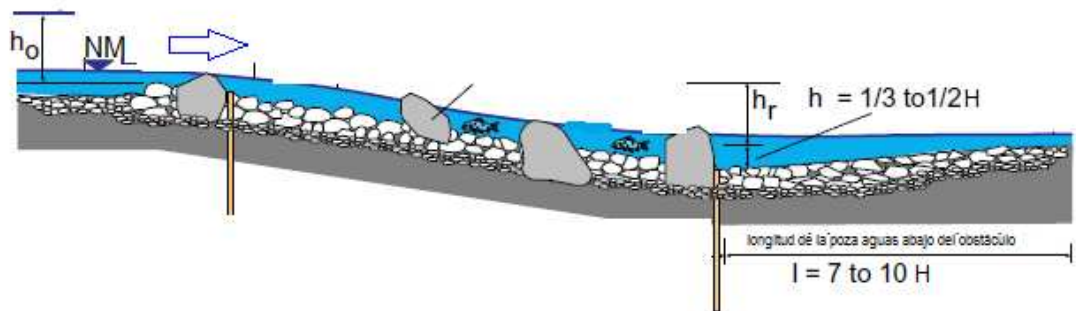
Algunos pasos para peces existentes tienen sus entradas orientado hacia el vertedero o sitio de descarga después del dique transversal en un ángulo de 180 ° con relación a la dirección de flujo del río. En tales casos la entrada no es adecuada ya que no se puede establecer un flujo de atracción.

3.4.4.4.1. Condiciones necesarias a cumplirse en la entrada del dispositivo

- Ubicación y orientación del dispositivo, la cual deberá encontrarse ubicado y orientado, paralelo al río o aguas abajo del mismo.
- La Poza de entrada, la cual por lo mínimo deberá cumplir las siguientes condiciones en su dimensionamiento:
 - Profundidad mayor a 1 metro (LARINIER, 1998)
 - Superficie mínima mayor a 3 metros cuadrados (Larinier 1998)

- La profundidad de la poza, desde el nivel aguas abajo del dique transversal registrado de un caudal medio, hasta el fondo de la poza será calculado con la siguiente relación $1/3$ o $1/2$ de H , siendo H la diferencia de altura de niveles aguas arriba a aguas abajo. (Gebler, 1990).
- La longitud total de la poza, para garantizar la continuidad del río aguas abajo, deberá estar entre 7 a 10 veces H . (Gebler, 1990).
- El número de Froude, deberá ser menor a 1, para evitar que se generen resaltos hidráulicos en la poza.

FIGURA 3.8 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS DIMENSIONES DE LA POZA.



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- Salida del agua deberá tener una velocidad mayor a 2 m/s
- Necesidad del empleo de dispositivos de guiado como:
 - Barreras físicas
 - Barreras eléctricas
 - Barreras sonoras
 - Barreras lumínicas

3.4.4.5. Salida del paso de peces y condiciones de salida

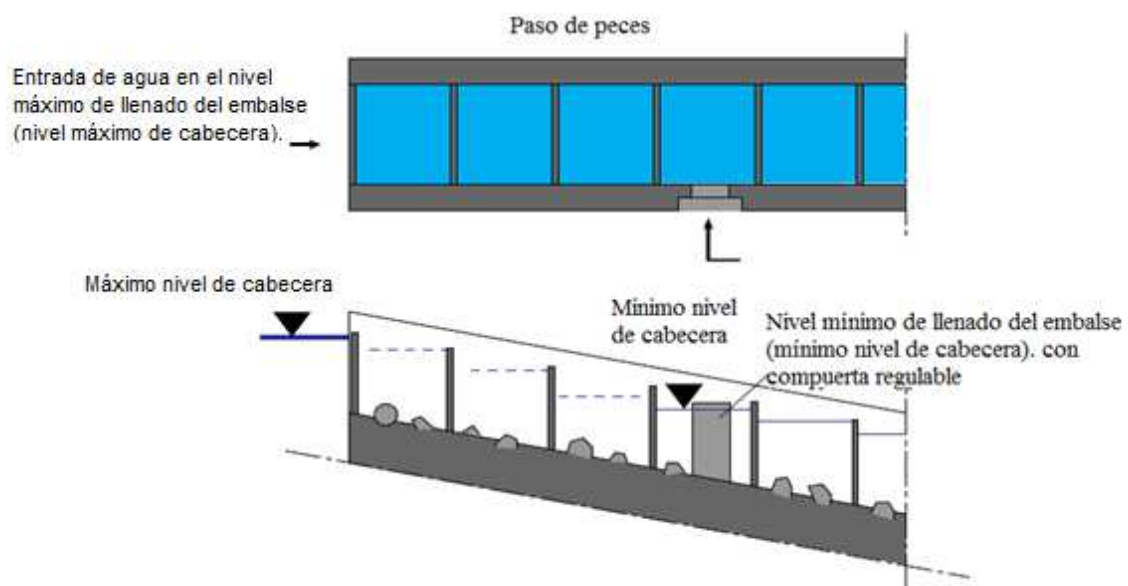
Por lo general las salidas de las escaleras de peces estarán ubicadas en la cabecera de la misma, es el mismo lugar por donde entra el flujo que recorre el paso. En muchas obras hidráulicas como en centrales hidroeléctricas la salida de los pasos para peces se ubica lo más lejos posible de la entrada de las turbinas o

de las compuertas de descarga evitando así que el pez sea arrastrado por el flujo de entrada aguas arriba.

En centrales hidroeléctricas se debe mantener la distancia mínima de 5m entre la salida del paso para peces y la turbina. Si la velocidad del flujo de la cabecera es mayor que 0,50m/s, el área de salida del dispositivo de paso tiene que ser prolongado en la cabecera por una pared de partición (Gebler, 1990).

Generalmente si el nivel de agua en la cabecera del embalse es constante, el diseño de la entrada del flujo del dispositivo de paso no presenta un problema, pero cuando el nivel del flujo varía se debe incorporar dispositivos que ayuden a superar este problema, una solución muy usada es la utilización de salidas de ranura vertical el cual se utiliza cuando el nivel del flujo varía entre (0,50 - 1,00)m, pero cuando la variación supera el máximo de 1,00m se puede incorporar varias salidas de ranura vertical en diferentes niveles del paso (figura 3.9).

FIGURA 3.9 DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS NIVELES DE CABECERA EN EL DISPOSITIVO DE PASO Y UBICACIÓN DE LA COMPUERTA REGULABLE.



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

En diferentes tipos de paso la regulación mecánica para la descarga del flujo, es un dispositivo funcional para que el flujo sea continuo, así como un control simple de apertura, pero cuando existen variaciones grandes de nivel en el embalse o en la entrada del paso se debe pensar en incorporar dispositivos como sistemas de control o dispositivos de barrera pero desgraciadamente estos pueden funcionar mal y reducir la eficacia del paso para peces.

Las altas turbulencias y las velocidades mayores a 2m/s en el flujo del río deben ser evitadas después de la salida del paso para peces, para que los organismos acuáticos dejen la sección del río posterior al área de la cabecera de la salida del dispositivo de paso con mayor facilidad.

La salida deberá tener una vinculación con el fondo del río o sustrato para que los organismos acuáticos puedan orientarse con el fondo del río por lo que se recomienda el uso de una rampa de piedras que cubra el espacio entre el fondo de la cabecera del dispositivo de paso con el fondo del río.

Se deberá proveer que la salida esté completamente limpia y libre de desechos por lo que se recomienda el uso de dispositivos como rejillas o sistemas flotantes, así como de un mantenimiento continuo. También debería ser posible cerrar el flujo a través de una compuerta para el control y mantenimiento.

3.4.4.5.1. Condiciones necesarias a cumplirse en la salida del dispositivo

- Alejada de la coronación del azud a una distancia mayor a 2 metros
- Se debe encontrar orientada perpendicularmente a la dirección del flujo de agua.
- Debe encontrarse protegida frente a materiales flotantes
- Se requiere el uso de una compuerta para;
 - Cerrar la alimentación
 - Dar mantenimiento
 - Impedir la migración de especies indeseables

- Se deberá tener preferiblemente una hendidura vertical a la salida del dispositivo de paso.

3.5. CAUDAL Y LAS CONDICIONES DE FLUJO EN EL PASO DE PECES

Para el caudal que deberá transitar por un dispositivo de paso para peces se ha propuesto en esta tesis que sea el caudal ecológico, que cumpla con las condiciones ambientales y que permita a la vez el libre paso de los peces, entre estas condiciones se determinará la utilización de un caudal mínimo para la atracción y navegación del pez, la que a la vez cumplirá con los requerimientos del caudal ecológico necesario.

Si el diseño provee la necesidad de incluir un caudal adyacente o cercano al caudal que circula por el río para obtener así el mínimo necesario de caudal ecológico que se requiere, se tiene que tener en cuenta que la mezcla de aguas de diferentes propiedades físico-químico perturba la capacidad de orientación olfativa de los peces y por lo tanto reduce su deseo de continuar con la migración.

El caudal entrante al paso para peces deberá de proveer que no produzca mucha turbulencia del flujo a través del paso para que los organismos acuáticos puedan realizar su migración independientemente de su capacidad para nadar. Se recomienda que la disipación de energía en el paso no supere los 200W por metro cúbico de volumen de agua.

La velocidad del flujo no debe superar los 2,00m/s en cualesquier parte del paso sean estas en escotaduras verticales u orificios, la velocidad de flujo medio del paso para peces debe ser menor al valor antes mencionado, el diseño de la parte inferior del paso debe de ser áspera para que así se reduzca la velocidad.

3.6. LONGITUDES Y DIMENSIONES DE UN PASO PARA PECES

Las características así como las longitudes de un paso para peces dependen de ciertos parámetros físicos del dispositivo, entre estos parámetros se citan a los más importantes:

- Pendiente del dispositivo
- Profundidad del dispositivo
- Anchura del dispositivo
- Caudal del dispositivo
- Propiedades de diseño geométrico del tipo de paso escogido
- Capacidades y aspectos biológicos de los peces en el dispositivo

Entre estos parámetros antes citados uno de los más importantes que rigen en las dimensiones de los pasos para peces es el de las capacidades y aspectos biológicos de los peces, el cual se deberá analizar el tipo de pez insignia o más abundante, así como también la longitud corporal promedio de las especies de pescado más grandes previstos en el río.

La diferencia en el nivel de agua debe ser considerada en las dimensiones de un paso para peces. En vista que una diferencia en el nivel de agua de sólo $h = 0,20$ m implica un aumento de velocidad por la caída del agua, este aumenta la turbulencia en el caso de usar dispositivos con estanques sucesivos, por ejemplo, en orificios se recomienda que la diferencia de nivel del agua entre los estanques en una escala de peces se mantenga por debajo de 0,2 m, Esta diferencia máxima en el nivel de agua conduce a una velocidad del flujo en la capa justo por encima de la parte del fondo rugoso del paso que permite que incluso los peces que tienen un rendimiento en natación débil puedan pasar.

El diseño y dimensiones de un paso para peces dependen mucho de los parámetros antes mencionados así como del tipo de dispositivo escogido para que el pez pueda migrar.

3.7. CONDICIONES GENERALES A CUMPLIRSE EN UN DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO

- Entrada fácil de encontrar para el pez
- Realizar un tránsito de una manera sencilla por parte del pez, sin heridas, estrés, agotamiento, ni fatiga excesiva.
- Tener una salida segura para el pez, evitando las desorientaciones presentadas muchas veces por el pez en su trayecto.

- Permita el paso de la mayoría de especies acuáticas, con respecto a la especie acuática predominante o la especie base de estudio para el respectivo diseño de paso.
- Funcional durante períodos de crecidas y estiajes
- Para el calado mínimo de tránsito normal del pez se tomará 0.25 cm más el tamaño del pez (Larinier 1998).

3.8. TIPOS DE DISPOSITIVOS DE PASO

Los dispositivos de paso para peces, podrán ser divididos de acuerdo a su funcionamiento en: dispositivos continuos y discontinuos, donde para los dispositivos de paso continuos, se pretenderá el paso del pez sin que haya saltos de agua y repartiéndose el caudal por todo lo largo del dispositivo, mientras que los discontinuos, tendrán sistemas de captura y transporte, produciéndose con esto saltos de agua.

Entre los dispositivos de paso discontinuos tenemos los siguientes:

- Esclusa de peces
- Ascensor para peces

Entre los dispositivos de paso continuos tenemos los siguientes:

- Ríos artificiales
- Escala de depósitos sucesivos
- Rampa para peces
- Escala de ralentizadores
- Pasos de escotaduras verticales

3.8.1. ESCLUSA PARA PECES

Este tipo de paso para peces trata de asimilar el funcionamiento de las esclusa de navegación en el cual se trata de salvar pendientes por medio de cámaras escalonadas que van desalojando el caudal aguas abajo a través de orificios formado por una compuerta móvil, controlados por operarios y maquinaria, este mecanismo lo que intenta es conectar 2 cámaras: una situada en el nivel del embalse y otra cámara aguas abajo conectados por un paso vertical o inclinado el

cual sirve para el paso del pez, generalmente se usa este tipo de paso para peces en proyectos con grandes embalses.

Resulta importante señalar 2 características que se han verificado en proyectos que se sirven de la esclusa para el paso de peces. La primera es su limitación frente a grandes acumulaciones de peces considerando a la esclusa como de moderada capacidad de transporte (Bonetto, 1985) y la segunda es que, comparadas con otros sistemas de pasajes, se pueden considerar poco traumáticas para los peces (Quiros, 1998).

3.8.1.1.Eficacia del dispositivo

La eficacia de este dispositivo se relaciona directamente con su poder de atracción y el comportamiento del pez, que debe quedarse en la cámara aguas abajo durante toda la fase de atracción, seguir el nivel del agua durante la fase de subida y salir de la esclusa antes del vaciado. Es necesario que las velocidades y las turbulencias en la cámara río abajo guarden un nivel aceptable para el pez. Es preciso evitar en la fase de llenado en un tipo de flujo demasiado rápido que podría crear turbulencias, una fuerte subida de aire hacia la superficie que pueden incitar al pez a quedarse en la cámara aguas abajo.

Resulta imposible determinar cuáles son las condiciones hidráulicas óptimas para los peces migratorios. Es la razón por la cual es conveniente dar una flexibilidad máxima al funcionamiento de la esclusa.

3.8.1.2.Maniobra del dispositivo

El funcionamiento de una esclusa para peces se divide en dos procesos diferentes:

- a) Funcionamiento para migración de pez desde aguas arriba hacia aguas abajo.
- b) Funcionamiento para migración de pez desde aguas abajo hacia aguas arriba.

3.8.1.3. Tipos de dispositivos de esclusas para peces

3.8.1.3.1. Cuando el paso es vertical

El funcionamiento para la migración desde aguas arriba hacia aguas bajo seguirá el mismo procedimiento de una esclusa para navegación a manera de que el pez es forzado junto con el caudal a situarse en una cámara aguas abajo. El proceso será el siguiente:

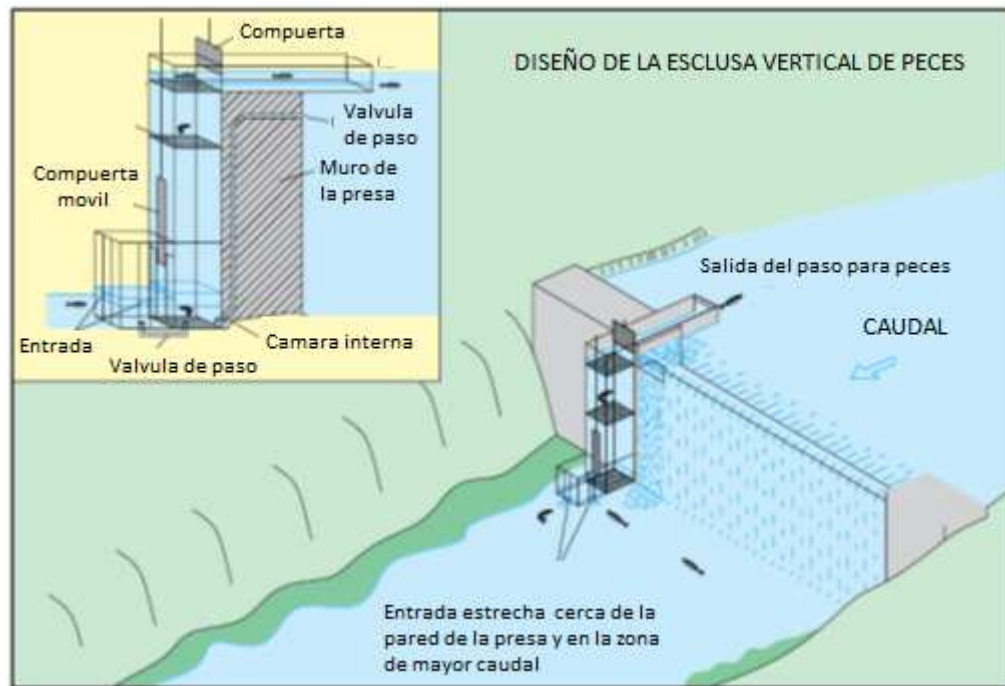
- 1) Los peces serán atraídos hacia la cámara situada aguas arriba.
- 2) En vista a que la esclusa para peces está totalmente inundada y llena de peces se cerrarán las compuertas de la cámara aguas arriba.
- 3) La descarga se realizará mediante un orificio en la cámara aguas abajo, un caudal controlado a manera de que el nivel de agua en la esclusa vaya bajando lentamente hasta que en la cámara aguas abajo se alcance el nivel de agua adecuado.
- 4) Se procederá a abrir totalmente las compuertas para que el pez salga y continúe con su respectiva migración.

Cuando la migración se da desde aguas abajo hacia aguas arriba el procedimiento es casi parecido al de un ascensor para peces, en el cual necesariamente necesitará del funcionamiento de la compuerta que se encuentre entre la cámara aguas abajo y el paso de la esclusa, el procedimiento es el siguiente:

- 1) El pez es atraído hacia la cámara aguas abajo
- 2) Cuando la compuerta ubicada entre la cámara y el paso de la esclusa se encuentre cerrada, por medio de una tubería que conecta la esclusa con el dispositivo, entra un caudal el cual llenará la parte inferior del paso hasta llegar a un nivel de agua igual al de la cámara ubicada aguas abajo.
- 3) Se abre la compuerta para que entren los peces a la parte inferior del paso de la esclusa.
- 4) Se cierra la compuerta y por medio de una válvula conectada a una tubería aguas arriba este llena el paso hasta alcanzar el nivel aguas arriba.

5) Luego se abre la compuerta de la cámara aguas arriba para que pueda salir el pez. En ciertos casos es necesario de una plancha de flotación mecánica para que el pez sea arrastrado por el paso desde aguas abajo hacia aguas arriba.

FIGURA 3.10 ESQUEMA DE UNA ESCLUSA CON PASO VERTICAL Y CON PLANCHA DE FLOTACIÓN MECÁNICA



Fuente: (Thorncraft G. and J.H. Harris, 2000).

3.8.1.3.2. Cuando el paso es inclinado (Tipo Borland)

Cuando el paso es inclinado el funcionamiento tiene un ciclo de tres fases las cuales son:

- Atracción
- Llenado y salida
- Vaciado

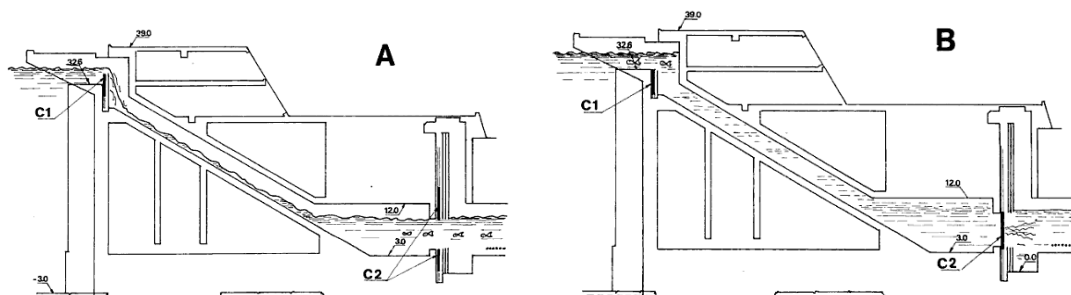
La esclusa con paso inclinado establece una circulación de agua desde el nivel superior al inferior que induce la entrada de peces al sistema, su posterior desplazamiento en sentido contrario al del flujo de agua, y salida hacia el embalse aguas arriba. El funcionamiento fue previsto de tal manera que se pueda accionar

en forma automática o manual, este tipo de esclusa sirve para el acenso y el descenso del pez, todo depende del procedimiento que se utilice.

- 1) Los peces son inducidos a entrar a la cámara inferior. La compuerta superior permanece parcialmente abierta permitiendo según diseño una descarga.
- 2) La compuerta superior permanece en la misma posición que en la primera etapa. La compuerta inferior se cierra y se llena la esclusa de agua hasta alcanzar el nivel del agua del embalse. En este proceso el pez debe subir durante el llenado, este paso es incitado por el caudal que fluye mientras se realiza el llenado.
- 3) La compuerta superior se abre completamente, mientras la inferior permanece parcialmente abierta en forma tal que permita la circulación de un caudal ($Q \text{ m}^3/\text{s}$). En tal condición la velocidad dependería tanto del caudal que entra como también del orificio creado por la abertura de la compuerta. En estas condiciones los peces deberán desalojar la cámara superior hacia el embalse inducidos por el flujo que fluye en sentido contrario. (Larinier 1998).
- 4) Se cierra la compuerta aguas arriba y se vacía la esclusa, se baja el nivel del agua de la esclusa.

Para la migración desde aguas arriba hacia aguas abajo el funcionamiento de la esclusa es el mismo, pero depende mucho de que el pez siga la correcta migración y de la temporada de migración.

FIGURA 3.11 FUNCIONAMIENTO DE LA ESCLUSA TIPO BORLAND.



A. Etapa de entrada de peces. B. Etapa de salida de peces C1. Compuerta superior C2. Compuerta inferior.

Fuente: Estructuras para asistir a los peces no salmónidos en sus migraciones: América Latina, Rolando Quiroz, Roma 1998.

3.8.1.4. Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento de las esclusas para peces.

- Se deberá atraer al pez mediante un flujo de agua continuo o discontinuo creado artificialmente a la entrada de la cámara.
- El diseño deberá ser apropiado de acuerdo al tamaño del pez insignia o pez más grande para que todas las especies migratorias presentes en el río puedan tener acceso a las cámaras de la esclusa para peces.
- La entrada deberá localizarse lo más próxima posible al punto más cercano aguas abajo del pie del dique transversal, para que los peces en su migración aguas arriba al encontrar un dique transversal sigan avanzando por cualquier camino alternativo hasta que quedan bloqueados definitivamente en la entrada de la cámara, dónde ya no existe alternativa.
- El diseño deberá prever que la velocidad de flujo que proviene del paso debe ser descubierta por el pez a la mayor distancia posible de la salida del paso. La llamada estará relacionada con la ubicación, orientación y cantidad de movimiento del flujo.
- La atracción de entrada es directamente proporcional al caudal circulante por la esclusa. Caudales elevados producirán en general velocidades elevadas a la entrada, pero siempre hay que tener presente las velocidades a que el pez puede nadar por lo que se requiere un estudio del pez.
- La pendiente de la esclusa deberá estrictamente permitir la subida del pez por lo que su pendiente se calculará en relación con el caudal circulante, el calado y la velocidad a la que puede nadar el pez.
- El funcionamiento de la compuerta ubicada en la salida de la cámara aguas abajo debe seguir los siguientes parámetros de funcionabilidad.
 - Cuando se produzca el vaciado la compuerta debe de abrirse a tal manera de que la velocidad de salida del flujo no sobrepase los 0,25m/s.
 - El orificio creado por el funcionamiento de la compuerta define el tiempo de llenado por lo que tiempo de llenado puede calcularse mediante la fórmula:

$$T_{ag} = 2 \left(\frac{AT_1 H^{\frac{1}{2}}}{CF2g^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

(Jens, 1982) Tiempo de llenado con abertura gradual (T_{ag})

Donde:

A: área transversal de la esclusa (m^2)

H: altura total de la esclusa (m)

F: sección transversal de los conductos de llenado (m)

C: coeficiente de descarga que varía entre 0,75 y 0,95 (adimensional)

T_1 = tiempo de apertura de la válvula (s)

- Este tipo de estructuras limita la capacidad de trabajo continuo a un período de funcionamiento de la esclusa en ciclos por hora, controladas por un operador.
- El límite de capacidad de transporte de peces en (Kg.) por cada ciclo, depende mucho de las dimensiones tanto del paso como de las cámaras. Pero aún así en condiciones ideales es muy difícil lograr transportar la capacidad de diseño debido a que muchos peces o no son atraídos a las cámaras o no dejan la esclusa como se tendría planeado.
- El modo de funcionamiento de la esclusa restringe el paso del caudal al 100% en el período de llenado de la esclusa, por lo cual necesariamente tendría que tener una obra aledaña para que se pueda asegurar que el paso del caudal ecológico calculado sea continuo y sin interrupciones.

3.8.2. ASCENSORES PARA PECES

Sistema o dispositivo mecánico que nació en base a la experiencia adquirida en la Costa del Este de Estados Unidos y Francia, propuestos por Travede en el año de 1992, cuyo mecanismo de operación consiste en la captura de las especies acuáticas migradoras, ubicadas al pie del dique transversal por medio de una cuba, con una cantidad de agua apropiada para que las especies acuáticas puedan ser elevadas y liberadas aguas arriba del dique transversal, con cierta periodicidad, de acuerdo al número de especies acuáticas que se requiera atrapar.

3.8.2.1. Modo de operación del dispositivo

1. Primero los peces son atraídos a un estanque, denominado “Estanque de Captura” a través de un canal denominado “Canal de atracción”, donde este tanque de captura se encuentra constituido o conformado por rejillas, a partir del cual se forma un dispositivo denominado anti – remoto.
2. Luego los peces son llevados a una jaula, donde por debajo de ella se dispone de una rejilla vertical, la cual tiene como función impedir la penetración de los peces por debajo de la cuba, cuando el dispositivo se encuentra en operación.
3. La cuba es elevada, por medio de un elevador eléctrico, el cual puede ser de estructura metálica u hormigón, para luego los peces ser liberados aguas arriba, a través del uso de compuertas.

3.8.2.2. Mecanismos de liberación de peces aguas arriba del dique transversal

Para la liberación de los diferentes peces en la salida del dispositivo o aguas arriba del dique transversal, se sugieren seguir las siguientes alternativas:

- Desagüe directo de la cuba en el embalse
- Canal de desagüe conectado al plano de agua, se utilizará cuando el ascensor no se encuentre instalado al nivel del embalse.
- Tratar de mantener la velocidad permanente o constante, para que los peces puedan llegar de una manera más fácil al embalse.

3.8.2.3. Modo de operación del dispositivo cuando se tiene un número de peces elevados en la migración

Muchas veces dependiendo del sitio de estudio y de sus condiciones naturales, nos encontramos con un gran número de peces, para su posterior elevación, donde se dificulta su captura con la cuba, se hace fundamental adoptar otro tipo de mecanismo y funcionamiento del dispositivo descrito a continuación:

1. Los peces son capturados y preservados en un estanque de gran tamaño en la entrada, para luego ser llevados al dispositivo denominado de anti retorno, descrito anteriormente.
2. Antes de ser elevados los peces, estos deben ser empujados a través de una rejilla móvil vertical, la cual se encuentra instalada sobre un carro mecanizado de desplazamiento horizontal, el cual se encarga de recoger la cantidad de peces retenidos en el estanque.

Este tipo de mecanismo y funcionamiento han sido actualmente utilizados en Francia en los ascensores de Golfech en el río Garona y Tuilierés en el río Dordoña, y propuestos por Larinier y Travade en el año de 1992, a continuación se describirán los tipos de ascensores, por medio del cual se entenderán de una mejor manera, los dos diferentes mecanismos descritos anteriormente.

3.8.2.4. Tipos de ascensores para peces

A continuación se citan, los diseños de ascensores más empleados en la actualidad.

3.8.2.4.1. Ascensor con dispositivo de captura integrado en la cuba

Se utilizará generalmente, cuando no se tiene una gran cantidad de número de peces o un volumen alto de alto de especies, en este tipo de ascensores no deben existir especies frágiles, con un alto riesgo a sufrir grandes daños o estrés, encontrándose perfectamente adaptadas a especies como: truchas y salmones, especies donde comúnmente no se tiene una gran migración de especies.

El principio y objetivo de funcionamiento es el descrito anteriormente, por lo que se citarán las respectivas recomendaciones y cuidados a tomar en cuenta para un

correcto funcionamiento de dicho dispositivo, especialmente para una adecuada captura del pez, entre las cuales tenemos las siguientes:

- La cuba debe siempre encontrarse en una posición baja
- Siempre se debe procurar que la rejilla que se encarga de separar, la superestructura del ascensor con la jaula de captura, se encuentre abierta

a) Modo de operación del dispositivo

Su maniobra u operación se encuentra de una manera general, delimitada por dos fases:

- FASE DE ELEVACIÓN DE LA CUBA Y DESAGÜE

Se encuentra delimitada por la rejilla vertical, que se encarga de impedir el acceso de los peces aguas abajo del dique transversal, para posteriormente ser elevados por medio de la cuba y vaciados aguas arriba del dique transversal.

- FASE DE DESCENSO DE LA CUBA

Después de ser vaciada la cuba, ésta es descendida, para lo cual la rejilla se abrirá para continuar con el proceso descrito anteriormente.

3.8.2.4.2. Ascensor con concentración de peces mecanizada

Se utiliza, cuando se tiene un alto número de especies migratorias y además cuando se encuentran especies acuáticas frágiles.

b) Modo de operación del dispositivo

Tiene un funcionamiento similar al anterior, pero con ciertas diferencias que se nombrarán a continuación, muy pequeñas pero de vital importancia en las fases de funcionamiento.

- FASE DE ELEVACIÓN DE LA CUBA

Aquí la cuba es ascendida y vaciada aguas arriba igual al anterior, pero con la diferencia en que ese momento, la rejilla mecanizada de tipo móvil, debe inmediatamente retroceder para su subsiguiente captura de los peces.

- FASE DE DESCENSO DE LA CUBA

Igual al anterior, la cuba desciende a la fase de captura y la rejilla vertical de separación inmediatamente volverá a abrirse.

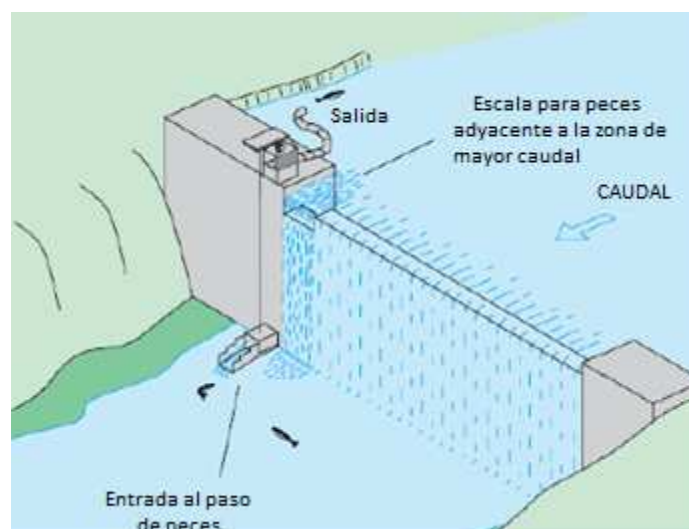
3.8.2.5. Ventajas

- Su costo de construcción en comparación, con el resto de dispositivos es relativamente bajo.
- Se necesita de un pequeño espacio para su instalación, por lo que no representa un estorbo para la obra o dique transversal a encontrarse, permitiendo una muy buena funcionabilidad de todo el sistema.
- Eficaces para especies que presentan una cierta dificultad de ser trasladados por medio de los dispositivos de paso para peces clásicos o tradicionales.

3.8.2.6. Desventajas

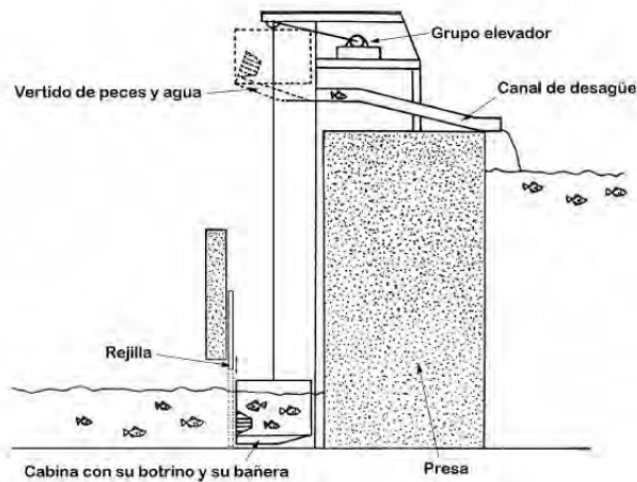
- Costos elevados de funcionamiento
- Avería de los distintos dispositivos
- Necesita de un mantenimiento continuo

FIGURA 3.12 DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ASCENSOR PARA PECES TIPO HOPPER



Fuente: (Thorncraft G. and J.H. Harris, 2000).

FIGURA 3.13 ESQUEMA DE DISEÑO Y COMPONENTES DEL ASCENSOR PARA PECES



Fuente: Universidad Politécnica De Madrid, Estudio Para La Mejora Hidráulica Y Adecuación Ambiental De Torneros De La Valderia Antonio Morán González, Julio 2009.

3.8.2.7. Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento del ascensor para Peces.

- Volumen de almacenaje a utilizarse:
 - Trucha: 2,00 litros por cada pez
 - Salmón: 30,00 a 60,00 litros por cada pez
 - Otros: 6,00 litros por cada kilogramo de pez elevado
- Para un correcto diseño de las rejillas, se deberán tomar en cuenta los siguientes parámetros:
 - Concentración de peces bajo la cuba
 - Tamaño de las especies
 - Mantenimiento a requerirse
- Volumen de agua mínimo disponible para cada pez:
 - Salmón: 80,00 a 150,00 litros
 - Trucha: 5,00 a 15,00 litros
 - Otros: 15,00 litros por kilogramo de pez atrapado
- Dimensiones mínimas de la estructura:
 - Salmón:
 - Longitud: 2,50 m

Ancho: 1,50 m

Profundidad: 1,00 m

Volumen: 3,50 m³

- Trucha:

Longitud: 1,50 m

Ancho: 1,00m

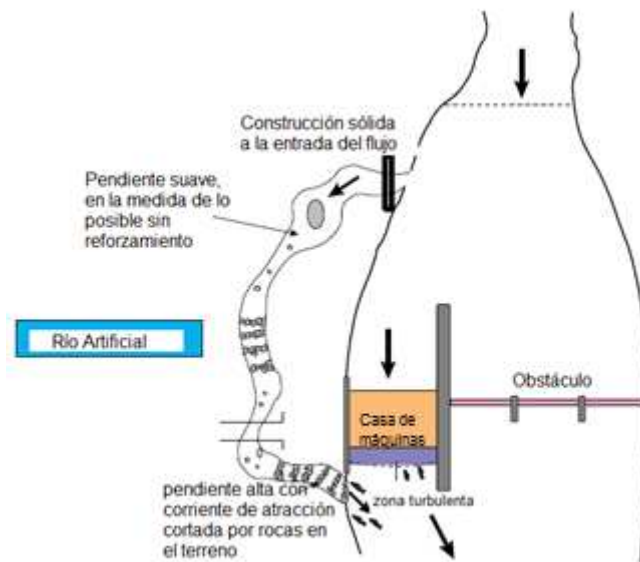
Profundidad: 0,80 m

- Velocidades presentadas en el flujo de agua
- El Salto hidráulico generado debe encontrarse entre 0,20 y 0,30 m.
- La velocidad que debe presentarse en las rejillas debe ser menor a 0,40 m/s
- La velocidad mínima a la entrada, debe estar en el rango de 0,60 a 1,00 m/s, para garantizar el ingreso de las distintas especies acuáticas.
- Separación de las rejillas, debe encontrarse entre 30,00 y 40,00 cm
- El espaciamiento entre barrotes debe encontrarse entre:
 - 2,50 a 3,50 cm, para peces de talla superior a 30,00 cm
 - 2,00 a 2,50 cm, para la trucha
- La velocidad máxima de inyección debe ser menor a 0,30 o 0,40 m/s.
- Para cubas de 300,00 a 800,00 litros de capacidad, el vaciado se lo hace libremente, pero cuando tenemos volúmenes mayores es necesaria la utilización de compuertas.
- Velocidades de flujo deben encontrarse entre 0,30 y 0,60 m/s
- Anchura del canal de transferencia:
 - Trucha: 0,50 m
 - Salmón: 1,00 m
- La altura entre el punto de desagüe y plano de agua debe ser menor o igual a 5,00 m, para con esto asegurar que los peces no se choquen entre ellos.

3.8.3. RÍO ARTIFICIAL

Consiste en conectar los niveles de agua presentes, aguas arriba y aguas abajo del dique transversal, por un canal natural con pendientes bajas del 3 al 5 % que imita un río natural, que incluyen bloques, espigones y umbrales de fondo, formando remansos de agua, los cuales reducen la velocidad de flujo presente en el río debido a la rugosidad presente en el fondo del canal, permitiendo de esta manera que los peces puedan ascender, además de generar un camino alternativo a los peces para que puedan sortear el dique transversal, de una manera rápida y fácil.

FIGURA 3.14 DISEÑO CONCEPTUAL DE UN RÍO ARTIFICIAL



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

3.8.3.1. Modo de operación del dispositivo

Se empieza recreando las condiciones naturales de la pendiente, caudal y material existentes en el medio natural, integrando el dispositivo al entorno natural, luego se necesita disipar energía, esto se consigue produciendo saltos de agua producidos por los materiales regularmente repartidos en el canal, debido a la rugosidad existente en el fondo del canal.

3.8.3.2. Ventajas

- Permite un adecuado retorno de los peces

- Buena integración con el medio natural
- Es adecuada y óptima para otros usos como el canotaje y rafting
- Permite de una manera relativamente óptima, el paso de especies acuáticas de tamaños diferentes.
- Construcción relativamente económica y requiere de un mantenimiento relativamente mínimo.
- La débil pendiente existente, que origina, longitudes elevadas del dispositivo, impidiendo la adaptación de dicho dispositivo a las distintas variaciones del nivel de agua, preferiblemente aguas arriba del dique transversal.

3.8.3.3.Desventajas

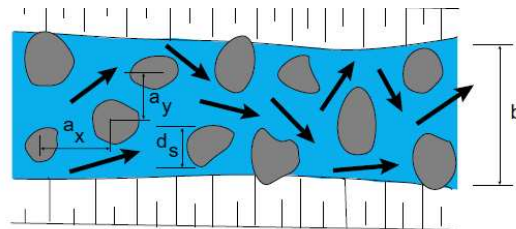
- Se encuentra limitada para diques transversales no mayores a 3 m
- Se necesita tener niveles de agua estables, a la entrada del dispositivo
- Resulta difícil ubicar la entrada del dispositivo al pie del dique transversal, debido a las bajas pendientes existentes para su diseño, limitando con esto su eficacia para cuando se tiene grandes cursos de agua.

3.8.3.4.Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento del río artificial.

- Pendiente desde 1:100 a 1:20
- Velocidad media del flujo
- Caudal de diseño (caudal ecológico)
- Rugosidad presente en el material, número de Manning
- Para cursos de agua relativamente menores, se recomienda dejar pasos por la obra, con una fracción del caudal total circulante.
- Se recomienda la instalación de este tipo de dispositivo, en cursos de agua de pendiente débil y además donde el nivel presente aguas arriba permanezca constante.
- Las dimensiones mínimas del canal serán:
 - $b > 1,20 \text{ m}$
 - $h > \text{calado natural del río}$
- Velocidad media del flujo deberá encontrarse entre 0,40 a 0,60 m/s

- La forma podrán ser sinuosas o rectas, posiblemente serpenteante, con piscinas y rápidos, rocas grandes dispersadas y tramos con pendientes pronunciadas.
- El caudal deberá ser mayor a $Q > 100$ l/s por metro
- El fondo del río deberá ser cubierto con un geo textil o grava fina, para luego colocar sobre esta una grava gruesa o piedras de río.
- La distancia libre entre las grandes rocas deberá estar entre 2 y 3 diámetros de la roca, en las direcciones (x, y), como se muestra a continuación en la figura 3.15.

FIGURA 3.15 DISTANCIA LIBRE ENTRE ROCAS



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- La distancia entre el borde inferior y el fondo del agua, deberán ser suficientes para formar zonas de descanso.
- La derivación debe extenderse hasta el límite aguas arriba de un remanso

3.8.4. ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS O ESCALA DE ARTESAS

Las escalas de depósitos sucesivos o escala de artesas consisten generalmente de una pendiente dividida por tabiques transversales de diferentes tipos de diseño, sin seguir un patrón específico, que forman estanques o depósitos sucesivos interconectados entre sí, por la que circula un caudal a través de vertederos, hendiduras verticales y/u orificios.

Este tipo de dispositivo es sin lugar a dudas el más utilizado, no solamente por su diseño simple, sino también por sus grandes posibilidades de uso. Un buen diseño puede ser utilizado, por diferentes especies de peces, se caracterizan por poder adaptarse con relativa facilidad a las obras hidráulicas futuras o existentes debido a su relativa facilidad de diseño, soportan muy bien cambios de dirección del flujo hasta 180° que son desviados para superar el dique transversal y transportar el caudal ecológico por otra dirección.

Entre los diseños más sencillos de paso de estanques sucesivos esta la conformada por una rampa inclinada que contiene estanques o piscinas conectadas en forma escalonada, separadas por una serie de tabiques instalados perpendiculares al flujo esta configuración permite la existencia de saltos de agua entre estanques al superar los tabiques. En este caso el paso de agua de un estanque al otro se efectúa por desbordamiento de superficie (tabiques vertientes), a través de escotaduras en los tabiques (escotaduras laterales o superiores) o a través de uno o varios orificios situados en los tabiques de separación (orificios sumergidos).

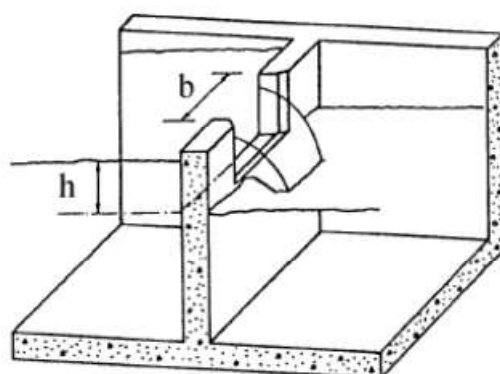
3.8.4.1. Tipos de depósitos sucesivos o escaleras de artesas

Según el tipo de paso de un estanque al otro a través del tabique, el flujo del agua puede comportarse de tres maneras: flujo con caída libre, flujo semisumergido y flujo sumergido, ya que este comportamiento es ocasionado por el tipo de escotadura que presenta el diseño.

3.8.4.1.1. Tabiques y escotaduras libres

La comunicación entre estanques se efectúa por encima de los tabiques o por escotaduras verticales en el centro o los lados laterales del tabique alternando sus posiciones de un tabique a otro por toda la longitud del paso. La comunicación entre estanques es en flujo con caída libre. Este tipo de pasos es adecuado para los salmones pero no para ciprínidos.

FIGURA 3.16 VISTA DE UNA ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS EN FLUJO CON CAÍDA LIBRE



Fuente: A. Mtz. de Azagra, 1999.

Tipos de paso de estanques sucesivos con tabiques y escotaduras libres

- PASOS DE TABIQUES

Es el paso más sencillo de diseñar, consiste en colocar tabiques a lo largo de una rampa con una determinada inclinación. El flujo de agua por encima de los tabiques producirá una serie de pequeños saltos que incitan al pez a pasar de un estanque a otro. Las limitaciones de este dispositivo están relacionadas con el comportamiento de los peces y el caudal, ya que sólo especies determinadas pueden realizar el salto. Otra limitación reside en que si el caudal es menor al mínimo de caudal necesario para que el pez realice el salto, el paso quedará totalmente inutilizado.

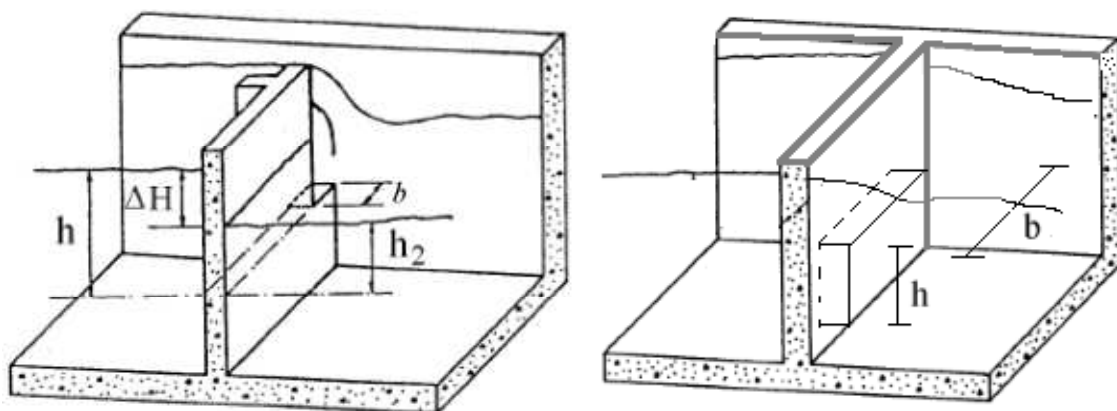
- PASO DE TABIQUES CON ESCOTADURAS LIBRES

Para el diseño en este tipo de paso a los tabiques se les incluye aberturas (laterales o en el centro), cuya altura generalmente no es superior a la mitad del tabique. De este modo se prevendrá el funcionamiento continuo del paso en caso de existir variaciones del caudal. La disposición de las escotaduras laterales generalmente se alternará de un tabique al siguiente. Las dimensiones de las escotaduras dependerán de las especies que utilizan el dispositivo, de modo que es necesario realizar un diseño diferente para el tipo de pez insignia o más grande.

3.8.4.1.2. Escotadura semisumergida y orificios sumergidos

Son pasos muy similares a los anteriores, la única diferencia es que la comunicación entre estanques en la escotadura semisumergida, produce en el paso una transición del flujo. En el caso de orificios sumergidos el flujo tendrá una descarga sumergida desde un estanque a otro. Este paso es adecuado para aquellos peces pertenecientes a la familia de los ciprínidos, truchas y salmónidos.

FIGURA 3.17 VISTA DE IZQUIERDA A DERECHA DE UNA ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS CON ESCOTADURA SEMISUMERGIDA Y CON ORIFICIO SUMERGIDO.



Fuente: A. Mtz. De Azagra, 1999

Tipos de paso con escotadura semisumergida y orificios sumergidos

- PASO DE TABIQUES CON ESCOTADURA SUMERGIDA

Consiste en un paso en el cual se ubica una escotadura en las partes laterales del tabique, su funcionamiento consiste en que se produzca una transición del flujo en la parte de la escotadura, de esta manera el pez no tendrá la necesidad de saltar sino sólo de transitar por la abertura. Sus limitaciones se dan en que el pez encuentre la abertura para poder pasar al otro estanque. La disposición de las escotaduras se da de manera alternada de un tabique al siguiente.

- PASO DE TABIQUES CON ORIFICIOS SUMERGIDOS

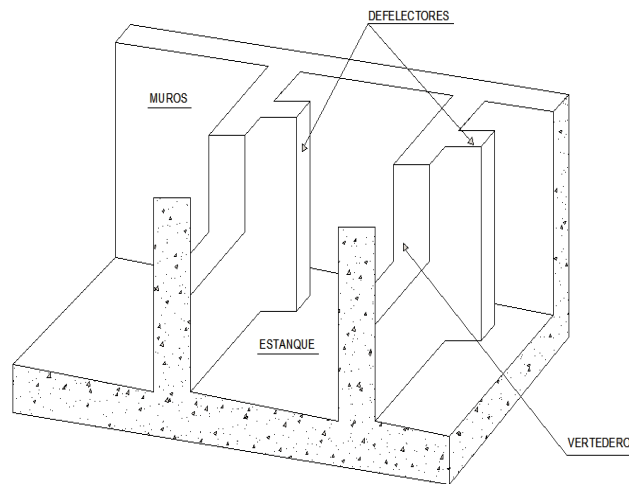
Consiste en un paso con orificio de dimensiones adecuadas para que el pez insignia o pez más grande pueda transitar por el orificio, generalmente esta abertura en el tabique se encuentra ubicada en la parte inferior del tabique, de esta manera produce una descarga del flujo sumergido.

- PASO DE TABIQUES CON ESCOTADURAS SEMISUMERGIDA Y ORIFICIOS SUMERGIDOS.

Este diseño combinará las dos posibilidades de paso del agua por los tabiques anteriormente nombradas. La conexión hidráulica entre estanques se realizará en regímenes de caudal normales a través de la escotadura superior o lateral y el orificio de fondo, situados de manera opuesta en el tabique y alternándose de un estanque a otro. En período de bajos caudales, podrá darse la situación que el agua sólo circule a través del orificio de fondo y no interrumpiría el paso continuo del caudal ecológico.

Este tipo de paso presentará pocas turbulencias y resultará adecuado para la mayor parte de las especies.

FIGURA 3.18 VISTA GENERAL DE UNA ESCALA DE ARTESAS



Fuente: A. Mtz. De Azagra, 1999

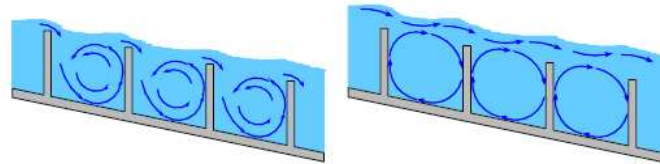
3.8.4.2. Comportamiento del flujo en la escala de depósitos sucesivos

Según Larinier (1992) el flujo de agua en el paso puede comportarse de dos maneras:

Flujo en profundidad.- Se da desde el nivel de cada tabique hacia el fondo del estanque. La energía se disipa por mezcla turbulenta y dispersión con un resalto situado al pie del salto. En este tipo de flujo el pez debe saltar en la lámina de agua para pasar de un estanque a otro.

Flujo en superficie.- Se forma a nivel del estrechamiento del tabique que separa dos estanques y permanece en superficie. Su energía se disipa en el estanque siguiente creando grandes zonas de recirculación.

FIGURA 3.19 ESQUEMA DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FLUJOS DE IZQUIERDA A DERECHA. FLUJO EN PROFUNDIDAD – FLUJO EN SUPERFICIE



Fuente: Estudio teórico de pasos de peces y desarrollo de una Metodología de evaluación de su eficacia por Borja Trapote Varona, (España 2009)

FIGURA 3.20 POSICIONES ESCALA DE DEPÓSITOS SUCESIVOS O ARTESAS (Larinier 1992).



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

3.8.4.3. Modo de operación del dispositivo

En si el funcionamiento de la escala de depósitos sucesivos consiste en dividir la altura a franquear en pequeños saltos, formando una serie de estanques los cuales estarán divididos por tabiques, la forma geométrica del diseño de los tabiques son las que en función de las cotas de nivel aguas abajo y arriba de la obra, determinan el comportamiento hidráulico del paso lo que directamente influye en la velocidad y caudal para que en función de las capacidades de natación y de salto de las especies implicadas logren completar la migración.

El proceso de funcionamiento es el siguiente:

- 1) El pez es atraído aguas abajo o aguas arriba del dique transversal sea el caso correspondiente.

2) Mediante la circulación del flujo a través de la geometría de los tabiques el pez atraviesa los estanques, esto depende de las capacidades de natación de los peces como también del diseño del dispositivo, indicados por medio de la velocidad máxima del agua en la caída entre estanques v , calculadas mediante la siguiente expresión:

$$v = \left(2g \frac{\Delta h}{N}\right)^{0.5} \quad (3.2)$$

Donde, $\Delta h/N$ es el desnivel entre estanques, calculado como el desnivel total a salvar Δh (en metros) dividido entre el número de estanques N , suponiendo que todos los saltos son iguales.

3) En el proceso de migración de un estanque a otro, el pez se enfrentara a una turbulencia en los estanques, un indicador simple que mide el nivel de agitación de los estanques es la potencia disipada.

$$P = \frac{\rho g Q \Delta h}{NV} \quad (3.3)$$

Donde, P es la potencia disipada en W/m^3

ρ : Densidad del agua ($1000kg/m^3$)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q : Caudal circulante por el paso (m^3/s)

Δh : Desnivel salvado por la escala entre dos estanques (m)

N : Número de saltos

V : Volumen de agua de cada estanque (m^3).

4) Salida del dispositivo de paso

3.8.4.4. Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento de la escala de depósitos sucesivos o artesas

- Para que la entrada sea fácil de encontrar por su ubicación o su situación se debe determinar un caudal apropiado que sirva para incitar entrar al pez al dispositivo.
- Los tabiques pueden ser de hormigón prefabricado o de madera

- Las dimensiones de los estanques deberán ser seleccionados de tal manera que los peces ascendentes tengan un espacio suficiente para moverse y que la energía contenida en el agua sea disipada con baja turbulencia.
- Para escalas cuyas especies objetivo sean los ciprínidos o especies que su biología no determine saltos para franquear diques transversales, se plantearán escotaduras semisumergidas y para salmónidos o especies que puedan generar saltos en su trayecto serán en vertido libre.
- Se fijará el salto entre dos estanques sucesivos, de acuerdo con las capacidades natatorias de los peces que deben franquear el dique transversal.

- Relación entre la longitud del estanque (L) y ancho del vertedero (B):

$$7 \leq \frac{L}{B} \leq 11$$

- Relación entre el ancho de los estanques (b) y ancho del vertedero (B):

$$4 \leq \frac{B}{b} \leq 8$$

- El ancho del vertedero será igual o superior a 0,20 cm
- La profundidad de los estanques desde la rasante del vertedero o la escotadura será de 0,6 m como mínimo para ciprínidos y salmónidos y de 0,8 m para el sábalo.
- El deflector presentará una longitud igual al del ancho del vertedero y se fijará a la misma distancia que el ancho del vertedero.
- El orificio de limpieza será cuadrado, presentando una sección mínima de $0,04 \text{ m}^2$.
- Los desniveles (carga de vertido) entre las láminas de agua de dos artesas consecutivas serán no mayores de 0,20 cm.
- La velocidad del agua en el interior de los vertederos no excederá 2,00 m/s.
- Además como criterio de diseño se asumirá que la potencia disipada por unidad de volumen no supere los $200,00 \text{ W/m}^3$ de esta forma se controlará las turbulencias producidas por el flujo en los estanques.
- La pendiente media del paso estará comprendida entre el 1:7 y el 1:15

- Los espesores de los tabiques interiores se recrecerán unos 0,15 cm y los exteriores 0,30 cm (condicionados por la morfología del azud).
- Con mantenimiento e inspección periódicos (tras avenidas y durante la migración. limpiar, quitar obstrucciones, reparar daños, evitar la pesca furtiva).
- Las dimensiones mínimas de los estanques dependiendo de la zona del río deberán seguir las siguientes indicaciones; observar figura 3.21.
 $l_b > 1,4 \text{ m};$
 $b > 1,0 \text{ m};$
 $h > 0,6 \text{ m}.$
- El caudal circulante deberá estar entre $Q > 80 \text{ l / s}$ para su correcto funcionamiento.
- Para el paso de tabiques con escotaduras semisumergidas y orificios sumergidos, se expone a continuación por medio de la tabla 3.1. las dimensiones a emplearse en función del tamaño del pez.

TABLA 3.1 DIMENSIONES A EMPLEARSE EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL PEZ

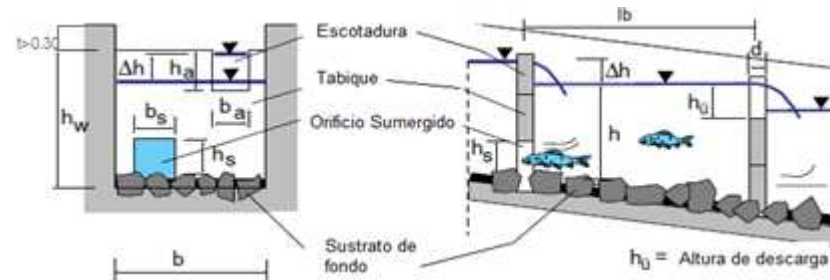
TAMAÑO DEL PEZ	DIMENSIONES DEL ESTANQUE			DIMENSIÓN DEL ORIFICIO		ESCOTADURA LATERAL		CAUDAL MÁXIMO EN EL DISPOSITIVO	MÁXIMO SALTO DE AGUA
	(m)			SUMERGIDO (m)		(m)			
(m)	Longitud	Ancho	Profundidad del flujo	Ancho	Altura	Ancho	Altura	(m³/s)	(m)
	lb	b	h	bs	hs	ba	ha	Q	ΔH
Mayor a 0.70	5 – 6	2.5 – 3	1.5 – 2	1.5	1	-	-	2.5	0.20
0.70-0.30	2.5 – 3	1.6 – 2	0.8 – 1.0	0.4 – 0.5	0.3 – 0.4	0.3	0.3	0.2– 0.5	0.20
0.30-0.15	1.4 – 2	1.0 – 1.5	0.6 – 0.8	0.25 – 0.35	0.25 – 0.35	0.25	0.25	0.08 – 0.2	0.20
Menor a 0.15	> 1.0	> 0.8	> 0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05 – 0.1	0.20

h_s : Altura libre por encima del sustrato de fondo

Si el diseño prevé dos escotaduras laterales, las dimensiones de la piscina deberán ser ampliadas

Las fuentes para el dimensionamiento del estanque para el tamaño de pez, mayores a 0.70 se han tomado de SNIP (1987)

FIGURA 3.21 ESTANQUES SUCEIVOS CON ESCOTADURA Y ORIFICIO SUMERGIDO



Fuente: Fish Passes, Design Dimensions and monitoring, Rome, 2002

- La pendiente ideal de los estanques se calculará con la fórmula siguiente:

$$I = \frac{\Delta H}{L_b} \quad (3.4)$$

Donde:

L_b : Longitud del estanque (m)

I : Pendiente del estanque (m/m)

- Número de estanques necesarios :

$$\eta = \frac{H_{tot}}{\Delta H} - 1 \quad (3.5)$$

η : Número de saltos (adimensional).

H_{tot} : Diferencia de niveles aguas arriba, aguas abajo del dique transversal (m).

- La velocidad máxima que ocurre dentro de los orificios y escotaduras se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$V_{os}, V_e = \sqrt{2g\Delta H} \quad (3.6)$$

Donde:

V_{os} : Velocidad máxima en el orificio (m/s)

V_e : Velocidad máxima en la escotadura (m/s)

g : Aceleración de la gravedad de la tierra (m/s²)

- Para el cálculo del caudal circulante por el orificio (Q_{os}), se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q_{os} = \psi A_s \sqrt{2g\Delta H} \quad (3.7)$$

$$A_s = h_s \times b_s \quad (3.8)$$

Donde:

A_s : Área del orificio sumergido (m²).

ψ : Coeficiente de descarga adimensional (0.65 – 0.85), obtenidos para orificios con sustrato inferior.

- Para el cálculo del caudal circulante por la escotadura lateral (Q_e), se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q_e = \frac{2}{3} \mu \sigma b_a \sqrt{2gh_u} \quad (3.9)$$

$$\sigma = \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta H}{h_u}\right)^{1.5}\right)^{0.385} \quad (3.10)$$

Ecuación válida para $0 \leq \frac{\Delta H}{h_u} \leq 1$, para $\Delta H > h_u$, $\sigma = 1$

Donde:

μ : Coeficiente de descarga adimensional ($\mu \approx 0.6$)

σ : Factor de reducción, en flujo ahogado (adimensional)

h_u : Altura de descarga en la escotadura (m)

- La energía disipada (potencia, E), en los estanques deberá ser menor a 200 W/m^3 , la cual será calculada con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho g \Delta H Q}{bh(l_b - d)} \quad (3.11)$$

$$Q = Q_{os} + Q_e \quad (3.12)$$

Donde:

l_b : Longitud del estanque (m)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

d : Espesor del tabique transversal (m)

b : Ancho del estanque (m)

h : Altura del nivel de agua en el estanque (m).

Q : Caudal total circulante (m^3/s)

- Velocidad del agua en el interior de los vertederos:
 - Ciprínidos: $V \leq 1.7 \text{ m/s}$
 - Salmónidos: $V \leq 2.1 \text{ m/s}$
- Profundidad media en el estanque (t_{med}):

$$t_{med} = p + h - \frac{\Delta H}{2} \quad (3.13)$$

Donde:

p : Altura del umbral del vertedero

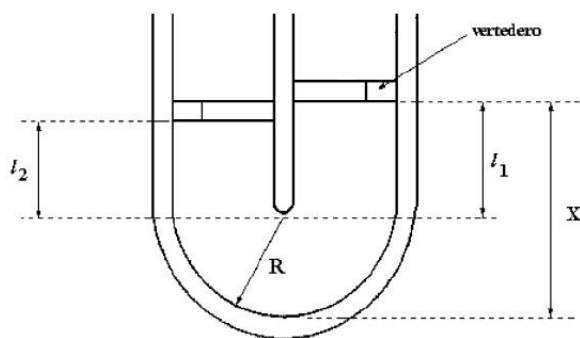
h : Carga sobre el vertedero

ΔH : Salto o desnivel presentado entre estanques sucesivos

Para las distintas especies acuáticas se ha llegado a determinar los siguientes valores de profundidad media:

- Trucha: 0.6 m
- Sábalo: 0.8 m
- Salmón: 1 m
- Dimensionamiento de una artesa en curva (caso especial):

FIGURA 3.22 ARTESA EN CURVA



Fuente: Estudio teórico de pasos de peces y desarrollo de una metodología de evaluación de su eficacia por Borja Trapote Varona, (España 2009)

Donde:

$$X \approx L$$

$$l_1 + l_2 \approx L$$

$$R \approx B$$

3.8.5. RAMPA PARA PECES

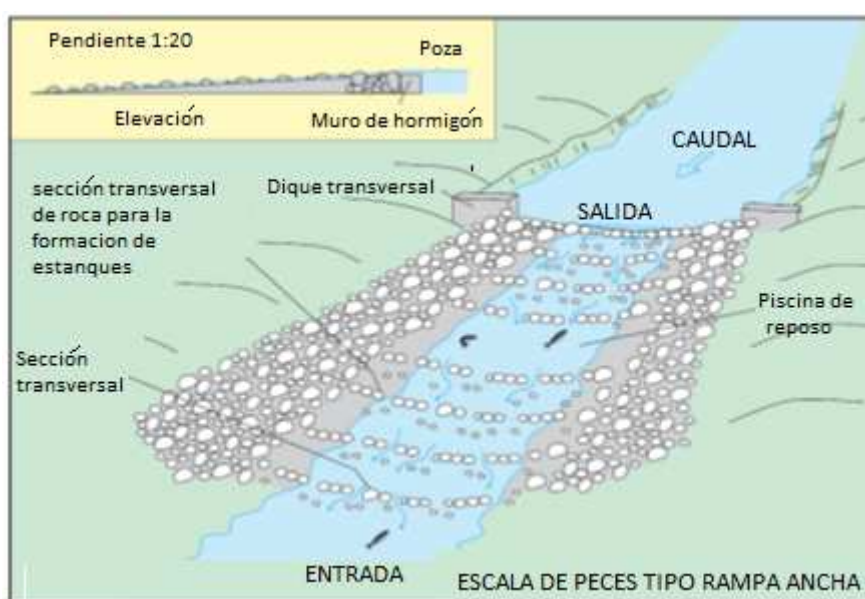
Se les denomina rampa para peces a los dispositivos conformados en forma de rampa con canales lisos o con tabiques interiores que utilizan sistemas de pendientes aledaños al azud su objetivo principal es eliminar el salto de agua al repartirlo a lo largo de toda la rampa creando transiciones graduales de esa manera ralentiza el flujo y permite el paso de los diques transversales menores a 2.5m. Son estructuras conformados de piedra o de hormigón, que puede ser de varios tipos las más utilizadas son; rampa para peces de máxima anchura, rampa para peces de anchura parcial.

3.8.5.1. Tipos de rampas de acuerdo a su tipología

3.8.5.1.1. Rampa para peces de máxima anchura

Los dispositivos de paso del tipo rampa para peces de máxima anchura pueden ser utilizados particularmente para evitar transiciones de flujo y resultan relativamente de bajo costo en comparación con otros dispositivos de tipo técnico; al mismo tiempo, sirven para controlar eficazmente fenómenos erosivos asociados al azud.

FIGURA 3.23 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA RAMPA PARA PECES DE MÁXIMA ANCHURA

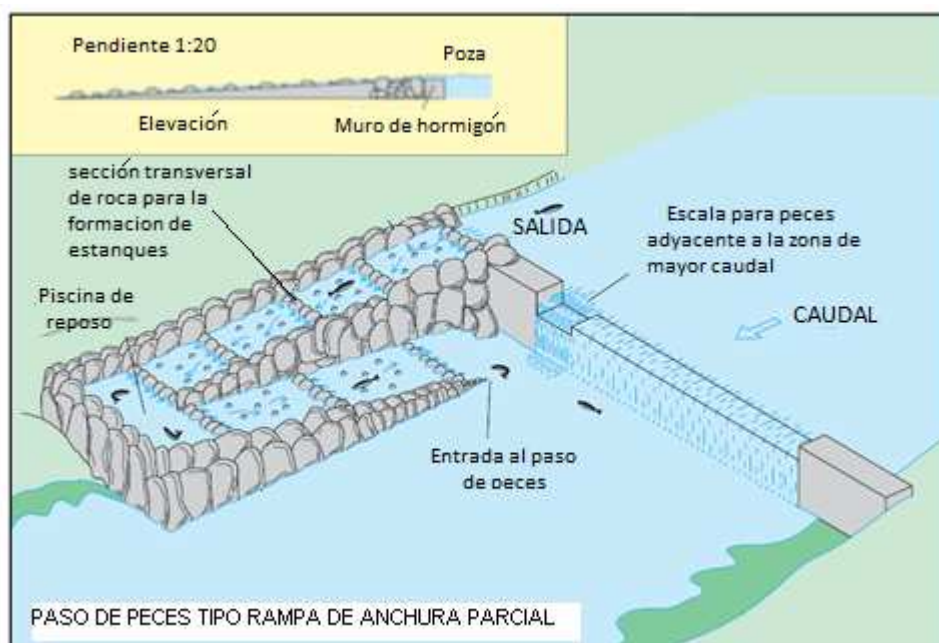


Fuente: (Thorncraft G. and J.H. Harris, 2000).

3.8.5.1.2. Rampa para peces de anchura parcial

Las rampas para peces de anchura parcial consisten en una serie de estanques interconectados que permiten superar el dique transversal, permiten una alta variabilidad de caudales, crean una gran variedad de refugios y velocidades, que facilitan el paso del pez e individuos con diferentes capacidades de franqueo de diques transversales.

FIGURA 3.24 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA RAMPA PARA PECES DE ANCHURA PARCIAL



Fuente: (Thorncraft G. and J.H. Harris, 2000).

3.8.5.2. Modo de operación del dispositivo

Debido al diseño de estos dispositivos que dependen mucho de su pendiente, velocidad y caudal para que el pez pueda ascender o descender por la rampa su funcionamiento se lo puede resumir en tres pasos:

- 1) El pez es atraído aguas abajo o aguas arriba de la rampa según sea el caso de migración.
- 2) De acuerdo al tipo de diseño optado en la rampa, el pez sortea diferentes diques transversales propios del diseño de la rampa, estos pueden ser rocas

de grandes dimensiones, pozas o estanques interconectados a lo largo de la rampa, actúan disipando energía hidráulica al mismo tiempo que supone una zona de descanso para los peces que están ascendiendo o descendiendo.

3) Salida del dispositivo de paso.

En estos dispositivos de paso la variabilidad de la velocidad debe ser analizada así como la máxima velocidad producida que se da cuando el agua cae a través de cada ranura o escotadura, la pendiente del canal y los intervalos entre ranuras o escotaduras controlan la velocidad del agua. La rugosidad del fondo de la rampa es aumentada preferiblemente con la colocación de rocas o cantos rodados, para aumentar las posibilidades de movimiento y de descanso de los peces en el fondo del cauce del río. Estos dispositivos de paso permiten que estos puedan ser diseñados en relación con las capacidades natatorias de las especies que se pretenda que puedan subir.

3.8.5.3. Tipos de rampas de acuerdo al material

3.8.5.3.1. Rampas de piedra

Son dispositivos que ayudan a los peces a franquear los distintos elementos transversales de los ríos y que además imitan las condiciones de un río natural., Presentan un plano inclinado con una pendiente siempre menor o igual al 10%, en la cual se insertan bloques de piedra de considerable tamaño, según su tipología.

a) Características de las rampas de piedra según su disposición interna

- **RAMPAS CONVENCIONALES**

Se construye mediante la disposición de una escollera de piedras y cantos rodados de 0,50 a 1,20 m de tamaño a menudo unidos unos a otros, la pendiente máxima dependerá de la especie de pez; para salmónidos 10% y 5% para ciprínidos.

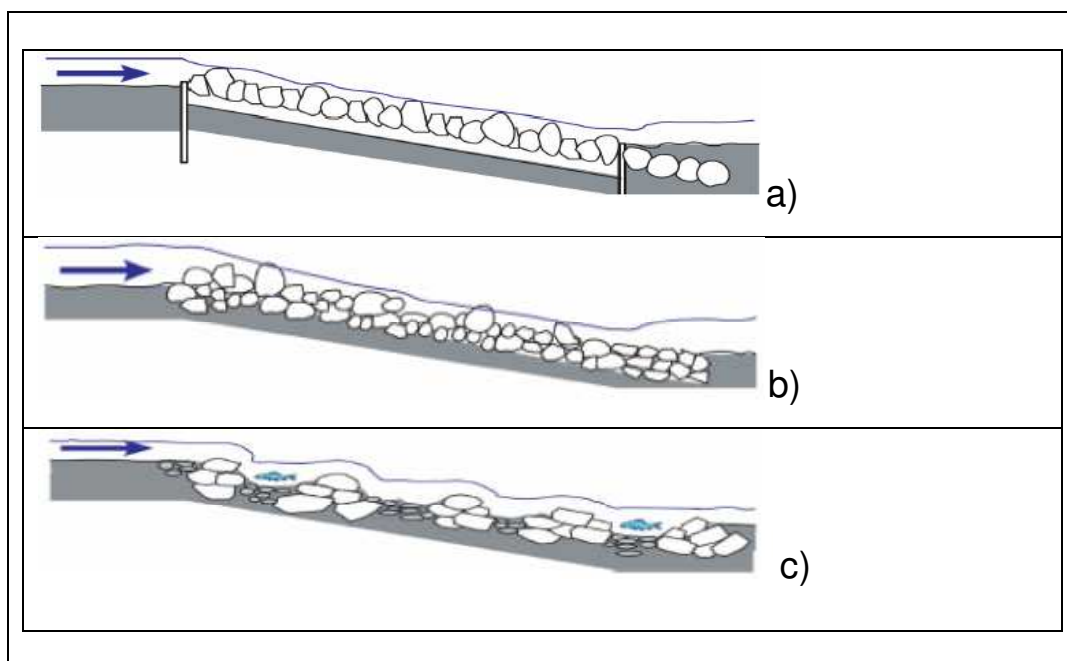
- **RAMPAS CON INCORPORACIÓN DE BLOQUES DE PIEDRA**

Se conforma de una de varias capas de escollera en la que se incorporan grandes bloques de roca para aumentar la rugosidad, requiere de estabilización en la zona de transición mediante la inclusión de un dissipador de energía en la parte final.

- **RAMPAS TIPO RÁPIDO-REMANSO**

Este tipo de rampa para piedras deberá imitar una secuencia natural de rápidos y remansos, las pendientes máximas serán de un 10% para los salmónidos y un 5% para ciprínidos, la profundidad media mínima del agua en los remansos, se recomienda que sea de 0,5 m para ciprínidos y 0,4 m para salmónidos.

FIGURA 3.25 ESQUEMAS DE RAMPAS PARA PECES. A) ESQUEMA DE UNA RAMPA CONVENCIONAL, B) ESQUEMA DE UNA RAMPA CON INCORPORACIONES DE BLOQUES DE PIEDRA, C) ESQUEMA DE UNA RAMPA TIPO RÁPIDO REMANSO.



Fuente: FAO/DVWK, 2002

Este tipo de pasos presenta las siguientes ventajas y desventajas:

a) Ventajas

- Ofrecen unas condiciones de paso y remonte mucho más adecuadas (tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo).
- Presentan un aspecto más acorde con el entorno
- Permiten su uso como un elemento más de evacuación de caudales (compatible para el desagüe del caudal ecológico).
- Las rampas crean una gran variedad de refugios y velocidades, que facilitan el paso de las especies e individuos con diferentes capacidades de franqueo de diques transversales.
- No interfieren en la obra que salvan
- Bajo mantenimiento

b) Desventajas

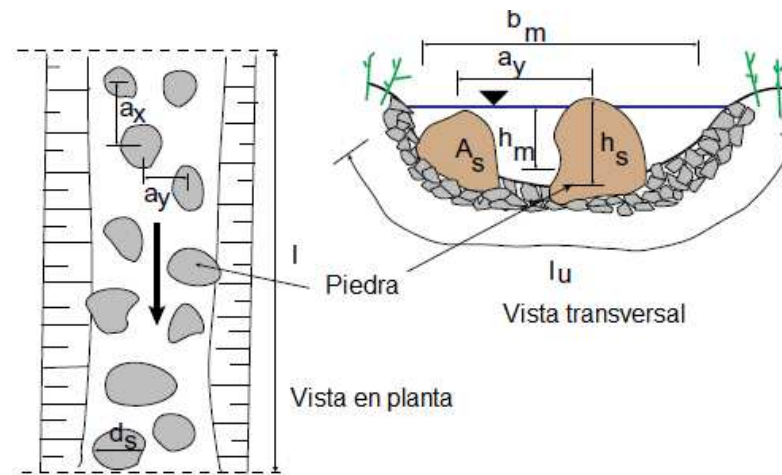
- Requieren una disponibilidad de espacio para poder construirse.
- Exigen caudales más importantes para asegurar su funcionalidad.
- Aplicables sólo a diques transversales de pequeña a mediana altura inferior a 2,50 m.

c) Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento de la rampa para peces.

- La rampa debe conservar las condiciones de ser un paso sumamente acorde con el entorno natural del río.
- La pendiente de la rampa deberá estar entre 1:8 y 1: 15.
- La longitud dependerá de la pendiente de la rampa para peces
- La velocidad será controlada, esto quiere decir que dependerá mucho de la pendiente y de la capacidad natatoria del pez, se recomienda entre 1m/s a 2 m/s.
- Las dimensiones de altura de las paredes de piedra de la rampa dependerá del calado necesario para que pase el pez se recomienda 0.25m más el calado mínimo (tamaño del pez + 0,25m).

- Las dimensiones de la anchura de la rampa dependerá mucho del caudal ecológico calculado y del proyecto ya que para estos tipos es necesario de un gran espacio, la cual no debe ser menor a 2,00 m.
- La disposición de los obstáculos (piedras) en forma de estanque o escotaduras, según sea la tipología de la rampa debe estar distribuido en tal forma que pueda asegurar que el pez pueda descansar y seguir con su respectiva migración en estos lugares.
- Se puede encontrar complicaciones en la entrada y en la longitud de la rampa por la acumulación de sedimentos que acarrea el río.
- Se construye mediante el establecimiento de rocas ubicadas aleatoria o uniformemente, los tamaños deberán estar entre 0,60 a 1,20 m.
- Se deberá establecer una capa base de piedras machacadas o de grava pequeña de diferente tamaño con una buena granulometría, con espesores mayores a 0,20 m.
- Su funcionamiento se puede dar para caudales $Q > 100 \text{ l/s}$
- El cuerpo principal del dispositivo tendrá forma de escollera, separadas por piscinas de longitud máxima de 4,00 m, esta distancia depende mucho de la capacidad de resistencia del pez.
- La altura de los saltos que produzcan la disposición rocas no deben superar los 0,20 m.
- La abertura en la cresta se calculará en función del caudal mínimo a transitar por el dispositivo.
- Se pondrá anclajes de hasta una profundidad de hasta 2,50 m, para evitar el deslizamiento de rocas grandes.
- Las aberturas entre las rocas no deberán ser inferiores a 0,20 m para que los peces más grandes no tengan problemas de obstrucción.
- La distancias de las rocas, deberán ser colocadas a una distancia $a_x = a_y = (1.50 \text{ a } 3.00 d_s)$, como se muestra en la figura 3.26.

FIGURA 3.26 RAMPA CONFORMADA POR LA DISPOSICIÓN DE ROCAS ALEATORIAS



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- Para el cálculo de velocidad media (V_m) de una rampa conformada por la disposición de rocas aleatorias, utilizar la fórmula de Darcy Weisbach. Para el cálculo del coeficiente de resistencia cuando la rampa dispone su diseño solo del sustrato el $\lambda = \lambda_o$, por lo que para cuando tenemos rocas grandes dispersas, se hará necesaria el uso de las siguientes ecuaciones adicionales.

$$V_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gr_{hy}I} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{\lambda_o} = -2 \log \frac{k_s/r_{hy}}{14.84} \quad (3.15)$$

$$r_{hy} = \frac{A}{I_u} \quad (3.16)$$

$$\lambda_s = 4C_w \frac{\sum A_s}{A_{tot}} \quad (3.17)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_s + \lambda_o(1 - \epsilon_o)}{1 - \epsilon_v} \quad (3.18)$$

$$\epsilon_v = \frac{28\frac{\pi}{4}d_s^2 h_m}{Al} \quad (3.19)$$

$$\epsilon_o = \frac{28\frac{\pi}{4}d_s^2}{A_{tot}} \quad (3.20)$$

Donde:

λ_o : Coeficiente de resistencia de la arena (Adimensional)

k_s : Rugosidad de la arena, menor a $0.45 r_{hy}$ (Adimensional)

A : Área transversal de una sección trapezoidal (m^2)

r_{hy} : Radio Hidráulico (m)

I_u : Perímetro mojado (m)

A_s : Área de la roca (m^2)

$A_{tot} = l \cdot l_u$, Área total de la rampa (m^2)

C_w : Coeficiente de forma de arrastre adimensional ($C_w \approx 1.5$)

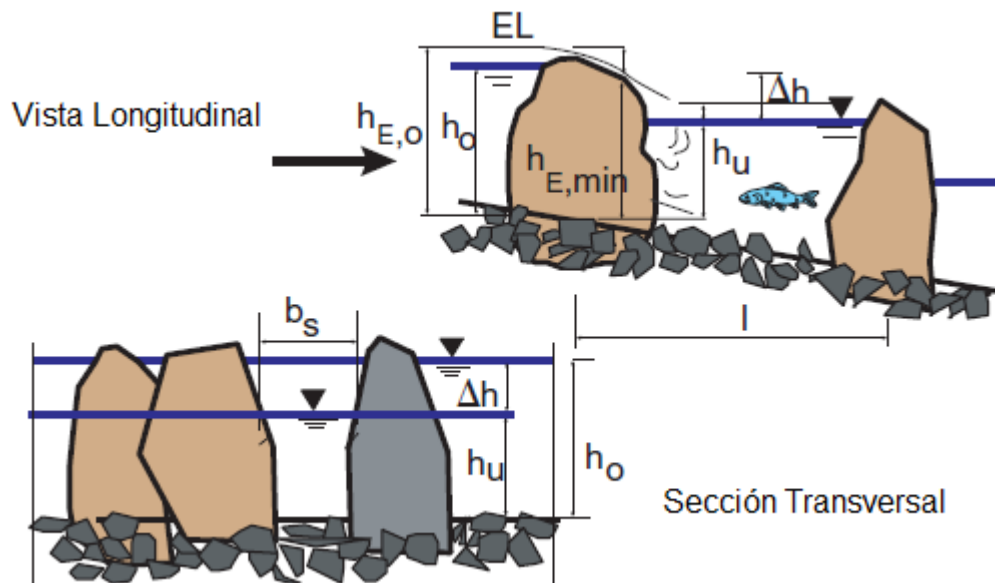
d_s : Diámetro de la roca (m)

- Para controlar el tipo de flujo a presentarse en la rampa, el número de Froud deberá ser menor a 1 (sin obstrucciones en la sección transversal).
- El área transversal trapezoidal de la rampa (A) conformada por la disposición de rocas aleatorias, se calculará mediante la ecuación de continuidad

$$Q = V_m A \quad (3.21)$$

Q : Caudal Circulante

FIGURA 3.27 GRÁFICO REPRESENTATIVO DE UNA RAMPA CONFORMADA POR ESTANQUES DE ROCA



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- Para el cálculo de velocidad máxima ($V_{m\acute{a}x}$) de una rampa conformada por estanques de roca se calculará mediante la siguiente ecuación.

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2g\Delta H} \quad (3.22)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$: Velocidad máxima en el orificio (m/s)

g : Aceleración de la gravedad de la tierra (m/s^2)

ΔH : Salto en los niveles entre estanques de roca (m)

- Para el cálculo de los anchos de flujo sin dique transversal ($\sum b_s$) en una rampa conformada por estanques de roca, se calculará despejando de la siguiente ecuación:

$$Q_e = \frac{2}{3} \mu \sigma \sum b_s \sqrt{2gh_o} \quad (3.23)$$

Donde:

h_o : Altura medida desde el sustrato hasta el nivel del agua

μ : Coeficiente de descarga adimensional ($\mu \approx 0.5 - 0.6$), para anchos de borde afilados, rocas y material triturado, ($\mu \approx 0.6 - 0.8$) para cantos rodados.

σ : Factor de reducción en descarga no ahogada $\sigma = 1.00$ (adimensional).

- La energía disipada (potencia, E), en una rampa conformada por estanques de roca deberán ser menor a 200 W/m^3 , la cual será calculada con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho g \Delta H Q}{b h_w I_w} \quad (3.24)$$

Donde:

A : Área del estanque (m^2)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

h_w : Profundidad media del estanque (m)

Q : Caudal total circulante (m^3/s)

b : Anchura media del estanque (m)

I_w : Longitud del estanque sin roca (m)

3.8.5.3.2. Rampas de hormigón

Estos tipos de paso tienen mucha relación con los pasos de rampas conformados en piedra con la diferencia que en hormigón se opta por dar una forma más geométrica y no en contraste con la morfología del río. En si el funcionamiento es el mismo que los antes nombrados, lo que podría cambiar es en la variabilidad de las velocidades ya que en estos tipos de rampa combinan pequeños muros que simula a las rocas de las Rampas conformados en piedra.

El tipo de rampa conformado en hormigón más nombrado es el paso de escotaduras verticales en hormigón armado se caracterizan por un funcionamiento hidráulico muy regular, con campos de velocidades bidimensionales (velocidades verticales casi despreciables) y muy poco variables con el caudal, lo que las hace adecuadas cuando se espera que los caudales circulantes fluctúen mucho.

a) Rampa en hormigón armado con fondo naturalizado

En varios proyectos que utilizan este tipo de rampas han introducido un fondo naturalizado de piedras y sustituyeron las paredes internas originales del diseño por grandes rocas, de aproximadamente 1 m^3 , ancladas al fondo con redondos de acero, y se cubre dicho fondo con cantos rodados de la zona revestidas con cemento.

Se basa en observaciones empíricas, donde los estrechamientos creados por las escotaduras generan una modificación de calado y velocidad, efecto parecido al creado por las rocas en la rampa.

b) Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento

- El dimensionamiento de la rampa se puede calcular aplicando el principio de continuidad y la fórmula de Manning, considerándose un canal de sección rectangular con pendiente constante en toda la longitud y calado h .
- Se considera un coeficiente adimensional de rugosidad de Manning $n = 0,025$, correspondiente a un valor medio para canales con enchado de piedra.
- Con el fin de considerar el efecto producido por las piedras de 1 m^3 introducidas en la rampa se hace una aproximación, en la que la rampa se asimile al modelo planteado por (Pena, L. *et al.* 2006) para escalas de escotaduras verticales, donde los estrechamientos creados por las escotaduras generan una modificación de calado y velocidad, efecto parecido al creado por las rocas en la rampa
- La velocidad en el estrechamiento se determina mediante la expresión:

$$V_b = 0.93 C_d \quad (3.25)$$

Donde C_d es un coeficiente adimensional de descarga, obtenido a partir de datos experimentales en función de la pendiente J (%); $C_d = 0,0544 J$ (%); $C_d = 0,3294$, y b es la anchura del estrechamiento en metros.

- La velocidad máxima debería quedar siempre por debajo de los 2 m/s , preferiblemente de media en torno o por debajo de 1 m/s .

- La pendiente de la rampa está en función de la diferencia de cotas de la transición y la longitud de la rampa para que esta cumpla con los rangos de velocidad antes nombrados y la pendiente inferior al 10%.
- Para la separación entre las piedras de 1m^3 introducidas en la rampa se realizará en forma alternada una junto de la pared izquierda y otra junto a la pared derecha cada $2(P/M)$ siendo P la dimensión horizontal de la piedra y M la separación que deja la piedra y la pared, observar en la foto 2.4 Anexo N°2.
- Se puede encontrar complicaciones en la entrada y en la longitud de la rampa por la acumulación de sedimentos que acarrea el río.
- El pez podría encontrar dificultades para entrar por la rampa ya que la transición desde el río a la rampa produce una diferencia de calados mínima lo cual se agrava con el aumento de caudal en el río esto produce un aumento de velocidad en la entrada de la rampa.

3.8.6. ESCALA DE RALENTIZADORES

Consiste en disponer de una serie de deflectores o ralentizadores en el fondo y paredes de un canal rectilíneo rectangular de pendiente fuerte, disipando con esto fuertes cantidades de energía presente en el flujo, permitiendo una velocidad relativamente baja en la parte inferior del dispositivo, posibilitando el paso adecuado y óptimo de los peces, esto permite tener pendientes empinadas en el dispositivo con relación a otros.

Caracterizándose los flujos de agua en los pasos de los ralentizadores una velocidad y aireación elevadas, siendo óptima para peces de gran tamaño y capacidades natatorias elevadas o de gran velocidad pero que lamentablemente el pez puede mantenerla por pocos segundos.

Entre las especies acuáticas generalmente adaptables a este tipo de dispositivo tenemos los siguientes:

- Grandes salmónidos
- Grandes truchas

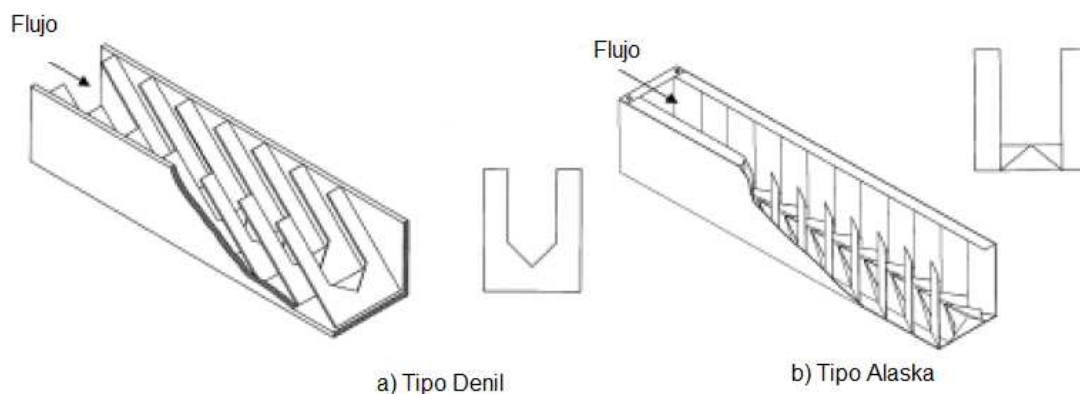
3.8.6.1. Modo de operación del dispositivo

Se requiere de la instalación de ralentizadores o deflectores, en la cara lateral del canal del dispositivo, las cuales ayudan a disminuir la velocidad que se presenta en el fondo del canal, generalmente se encuentran intercalados, abarcando la mitad del ancho del canal.

Las pantallas tienen como función principal, reducir la velocidad del agua en el fondo del vertedero, además de servir como zonas de descanso y ascenso, permitiendo que el pez pueda mantener su energía, generalmente son de tipo sumergidas, ubicadas en el fondo del canal y vacías en sus extremos.

En estos dispositivos el pez tendrá que superar el paso en un sólo intento, ya que no podrá descansar entre los ralentizadores o hasta un estanque intermedio.

FIGURA 3.28 ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESCALA DE RALENTIZADORES



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, Estudio para la mejora hidráulica y adecuación ambiental de los aprovechamientos del río Eria a su paso por el T.M. de Torneros de la Valderia (León), Antonio Morán González, Julio 2009.

3.8.6.2. Tipos de escalas de ralentizadores

a) Ralentizadores planos o tipo denil

Es el tipo de ralentizador comúnmente más empleado y ampliamente utilizado en la costa este de Estados Unidos y Europa, para el salmón especialmente,

caracterizándose por tener una facilidad en la construcción de los deflectores, debido su forma plana y siendo de madera u hormigón preferiblemente.

b) Ralentizadores de fondo

Se caracteriza por tener deflectores de fondo colocados en un plano paralelo al fondo del canal, encontrándose estos dispuestos en bandas longitudinales, en doble sentido en un mínimo indefinido, donde para establecer el flujo existente de agua en el dispositivo, se separa cada hilera de los ralentizadores por medio de una banda longitudinal a la misma altura.

c) Ralentizadores mixtos o tipo Alaska

Se caracterizan por tener pequeñas dimensiones, aptos para pendientes fuertes, de material prefabricado compuesto por elementos de aleación de aluminio y transportados por helicóptero al sitio de implantación.

3.8.6.3.Ventajas

- Permite utilizar pendientes hasta del 25 %, sin la necesidad de forzar a una acrobacia de los peces.
- Su construcción se la puede realizar con materiales económicos, como por ejemplo madera inmunizada.
- Se necesita de poco mantenimiento
- El ralentizador plano, se caracteriza por su eficiencia desde el punto de vista hidráulico.

3.8.6.4.Desventajas

- Falta de mantenimiento en los canales
- Difícil acceso en lugares aislados
- Instalaciones de alta complejidad
- No da mucha importancia a la entrada y salida de peces
- Su diseño es complejo, por lo que para su diseño, se ha partido en base a prototipos o maquetas ensayadas a escala
- Condiciones de funcionamiento bastante estrictas, en los niveles de operación: aguas arriba y abajo del dique transversal.

- Puede existir atrapamientos por parte del pez, por lo que es necesaria la vigilancia, especialmente durante la migración de la especie acuática.
- Existen pocos datos disponibles de la relación calado – caudal, donde los poco existentes, nos son comparables ya que se tienen condiciones muy diferentes en cada sitio de estudio o de implementación del dispositivo.
- El ralentizador plano, presenta una gran sensibilidad a la obstrucción debida a las ramas u materiales naturales presentes en la naturaleza.

Debido a la eficiencia hidráulica, existe una energía cinética limitada, para la llamada de agua a la entrada del paso del dispositivo

3.8.6.5.Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento de los ralentizadores

- Distancia existente entre deflectores, la cual a su vez depende de los siguientes factores:
 - Velocidad del flujo
 - Temperatura del agua
 - Capacidad del nado del pez, para ascender por la inclinación existente en la escala.
- El dispositivo debe encontrarse completamente hincado en el agua, asegurando así que los peces no asciendan saltando y que en época de estiaje el primer deflector o pantalla se encuentre completamente sumergido.
- En cada desnivel existente, se requiere la instalación de un estanque de descanso, para que los peces no sufran un sobreesfuerzo durante el ascenso de los mismos.
- Las pendientes y las relaciones entre dimensiones de los deflectores en un ralentizador tipo Denil, se mostrarán a continuación en las tablas 3.2, 3.3.

TABLA 3.2 VALORES DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LOS DEFLECTORES EN UN PASO TIPO DENIL DEPENDIENDO DE LA ANCHURA DEL CANAL SELECCIONADO, LONNEBJERG (1980) Y LARINIER (1992).

RELACIÓN DE DIMENSIONES DEL RALENTIZADOR	DIMENSIONES	RANGOS DE TOLERANCIA	VALORES GUÍA RECOMENDADOS
Ancho mínimo y máximo del Deflector	ba/b	0.5 – 0.6	0.58
Espaciamiento entre deflectores	a/b	0.5 – 0.9	0.66
Distancia entre el punto más bajo de corte y la parte inferior del ralentizador con el ancho total del ralentizador	$c1/b$	0.23 – 0.32	0.25
Profundidad de la sección triangular	$c2/c1$	2	2

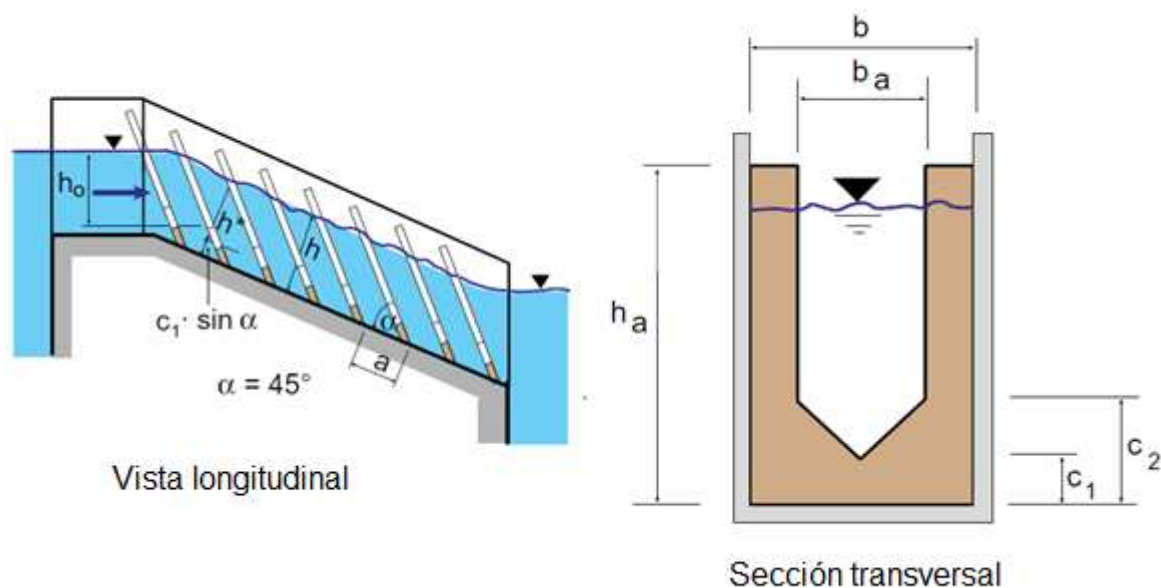
Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

TABLA 3.3 VALORES DE REFERENCIA PARA ANCHOS DE CANAL Y PENDIENTES EN LOS RALENTIZADORES TIPO DENIL (Larinier 1983).

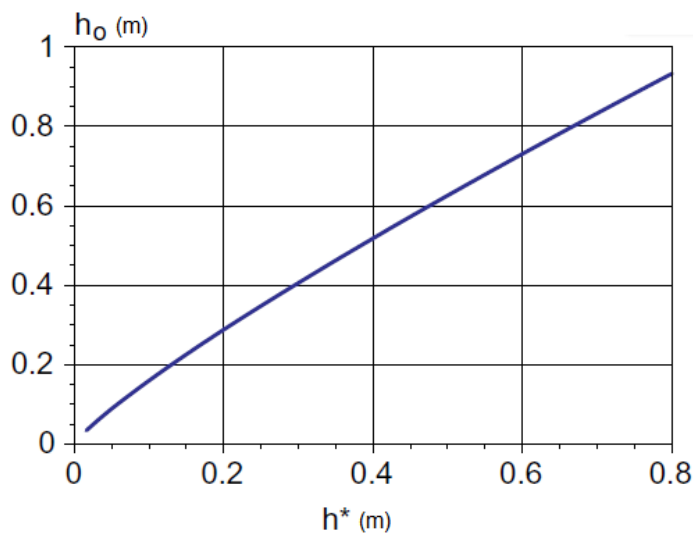
Tamaño del pez	Ancho del canal (b)	Pendiente recomendada (I)		Descarga de agua (Q) (m ³ /s) para $h^*/b_a=1,5$
	(m)	%	1:n	
0,30 - 0,70	0.60	20.00	1:50	0.26
	0.70	17.00	1:5,88	0.35
	0.80	15.00	1:6,67	0.46
	0.90	13.50	1:7,40	0.58
0,30 - 0,18	0.80	20.00	1:50	0.53
	0.90	17.50	1:5,70	0.66
	1.00	16.00	1:6,25	0.82
	1.20	13.00	1:7,70	1.17

$h^*/b_a \approx 1,5$ recomendado (Lonnebjerg, 1980), calculado según la ecuación 3.25, con las dimensiones recomendadas de las paredes transversales según la tabla 3.2.

Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

FIGURA 3.29 DIMENSIONAMIENTO DE LOS RALENTIZADORES TIPO DENIL

Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

FIGURA 3.30 RELACIÓN DE $h^* = f(h_0)$ 

Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- Para la configuración del ralentizador se necesitará relacionarla con la distancia recorrida por el pez, la cual nos indicará las longitudes de los ralentizadores individuales antes de poner un estanque de descanso y proseguir con la configuración del dispositivo.

- La configuración de los estanques de descanso tendrán por longitud la longitud del ralentizador individual dividido para 3.00, el fondo tendrá que estar sumergido 20,00 cm, en donde pondrá un sustrato de roca.
- En base a las relaciones proporcionadas por las tablas, se empleará la ecuación propuesta por Kruger en 1994, para calcular los valores requeridos.

$$Q_e = 1.35 b_a^{2.5} \sqrt{gI} \left[\frac{h^*}{b_a} \right]^{1.584} \quad (3.26)$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad de la tierra

I : Pendiente del ralentizador

h^* : Altura de agua del ralentizador

b_a : Abertura del deflector

- Para el cálculo de la energía disipada en el estanque se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\frac{\rho}{2} Q_e v^2}{b_m h_m l_b} \quad (3.27)$$

Donde:

b_m : Anchura media del estanque

h_m : Profundidad del flujo

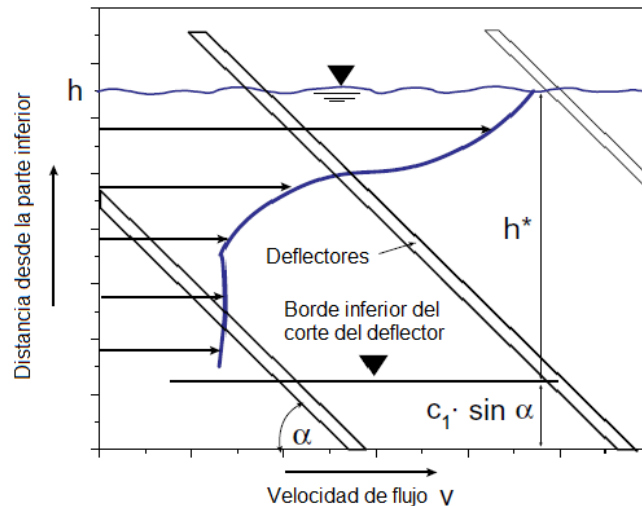
l_b : Longitud del estanque

ρ : Densidad del agua

v : Velocidad de flujo admisible

- Para determinar la velocidad será garantizada por el diseño correcto de los deflectores de acuerdo a la figura 3.31.

FIGURA 3.31 DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD CARACTERÍSTICA EN UN RALENTIZADOR TIPO DENIL (KRUGER, 1994).



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

$$v = \frac{Q_e}{(h^* b_a)} \quad (3.28)$$

- Para los ralentizadores planos, la inclinación de los ralentizadores se deben encontrar formando un ángulo de 45 ° con el canal.
- La pendiente del canal, para los ralentizadores deberán encontrarse entre 1:5 y 1:10.
- Se recomienda su uso para especies acuáticas generalmente superiores a 18 cm.
- Las dimensiones mínimas para el canal del dispositivo son:
 $b > 0,6 \text{ m}$;
 $h > \text{calado mínimo (tamaño del pez} + 0,25) \text{ m}$;
 $l < 1:5$;
- Estos dispositivos funcionan para caudales $Q > 250 \text{ l / s}$
- Los estanques de reposo se requiere para alturas $> 1,5 \text{ a } 2 \text{ m}$
- Pueden utilizarse este tipo de dispositivos, para especies de menor tamaño, siempre y cuando se reduzca el tamaño del ralentizador, pero sin garantizar su eficiencia.

- Los cambios de dirección del dispositivo se harán por medio del uso de estanques intermedios, que se harán cada 8 m máximo (Denil, 2002).
- En los estanques intermedios del dispositivo, la disipación de energía volumétrica deberá ser inferior a $E = 25 - 50 \text{ W/m}^3$.

3.8.7. PASOS DE ESCOTADURAS VERTICALES

Consiste en la formación de una rampa inclinada con tabiques incompletos, es una variación de una escala de artesas o de depósitos sucesivos, diferenciándolas por tener una o dos escotaduras en los lados laterales, tanto en la zona central como en la parte lateral del dispositivo, de tal forma que el agua circule a través del espacio existente entre el tabique y la parte lateral del dispositivo, permitiéndose con esto una disipación eficaz de energía y asegurando la formación de zonas de baja velocidad, donde puedan descansar los peces.

El paso por la escotadura hace que sea posible crear un sustrato de fondo continuo a lo largo de todo el dispositivo, la disposición de rocas en los estanques formados por los tabiques ayudará a reducir la velocidad de flujo cerca de las escotaduras.

3.8.7.1. Modo de operación del dispositivo

Se asegura que el agua fluya por medio de la rampa, por el paso de la misma a través de las escotaduras verticales, pero a su vez tratando de evitar que se genere algún tipo de salto, luego el caudal que pasa por las diferentes escotaduras converge en la zona central de paso de los peces, asegurando una disipación eficaz de energía y creando zonas de reposo en la parte lateral del dispositivo de agua y opuestas a su vez al flujo de agua.

Para el cálculo hidráulico y las condiciones de funcionamiento se deberá revisar las siguientes variables: profundidad de agua, velocidad de flujo en la escotadura, caudales y disipación de energía.

3.8.7.2. Tipos de dispositivos de escotaduras verticales

De acuerdo a su forma y disposición del tabique, se pueden distinguir los siguientes tipos de diseño de escotaduras verticales.

a) Dos escotaduras verticales

También denominado tipo Hell's Gate, se caracterizará por componerse de dos aberturas flanqueadas por deflectores laterales, permitiendo que el flujo de agua se concentre en tramo siguiente.

Generalmente el agua en este tipo de diseño, se caracterizarán por circular por dos vías paralelas, que se juntan en una sola antes de llegar al tabique central, permitiendo la disipación de energía necesaria para el paso de los peces.

Los deflectores laterales existentes, tendrán la función de permitir que parte de agua que llega a los peces, pueda ser re direccionada aguas arriba del dique transversal, ayudando igualmente a la disipación de energía, pero además creando zonas de baja velocidad aptas para el descanso de los peces.

b) Escotadura con deflectores laterales

Tiene la misma metodología de funcionamiento de anteriormente citado, pero su diferencia radica en que el choque del flujo de agua es contra la pared de la rampa, opuesta a la abertura existente debido a la presencia de los deflectores.

c) Escotadura sin deflector

Aquí los tabiques se encontrarán instalados en ambas paredes de la rampa, perpendicular al flujo y alternados unos y otros, con lo que las aberturas laterales no se encuentran a un mismo lado de la rampa, consiguiendo de esta manera una disipación de energía, similar a los anteriores tipos de escotaduras verticales.

3.8.7.3. Ventajas de las escotaduras verticales

- Soporta grandes variaciones de los niveles de agua a presentarse
- Funcionamiento hidráulico estable
- Los peces pueden pasar el dique transversal, a una profundidad elegida
- Presenta buenas condiciones de descanso de los peces

3.8.7.4. Bases y restricciones para el dimensionamiento y funcionamiento del paso de escotaduras verticales.

- Las tabiques transversales podrán tener 1 o 2 escotaduras laterales
- Los tabiques podrán ser de madera u hormigón armado, así como también el deflector.
- El espesor del sustrato debe ser menor a 0.2 m y el diámetro del material granular tendrá que tener un diámetro entre 50 y 60 mm.
- El salto entre estanques tiene que ser menor o igual a 0.20 m
- Las dimensiones mínimas de los estanques:
Longitud del estanque > 1,90 m;
Ancho del estanque > 1,20 m;
Altura del estanque depende del calcado mínimo;
- El caudal debe ser mayor que $Q > 140$ l/s.
- La altura de agua en el tabique deberá ser el suficientemente grande para prevenir los sofocos de descarga en la hendidura, esto se cumple con las siguientes condiciones $h_u > h_{gr}$, $V_{m\acute{a}x} > V_{gr}$.

$$h_{gr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gS^2}} \quad (3.29)$$

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2g\Delta H} \quad (3.30)$$

$$V_{gr} = \sqrt{gh_{gr}} \quad (3.31)$$

Donde:

h_u : Profundidad del agua hasta el sustrato (m)

h_{gr} : Altura para garantizar la condición (m)

V_{gr} : Velocidad para garantizar la condición (m/s)

Q : Caudal circulante

- En la entrada y en la salida, se tendrá que diseñar un cajón de longitud 1,00 m con sección transversal libre con dirección al río y pendiente 1:15.

- Para el cálculo del número de estanques (n), se utilizará la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{H_{tot}}{\Delta H} - 1 \quad (3.32)$$

Donde:

η : Número de Saltos (adimensional)

H_{tot} : Diferencia de niveles aguas arriba, aguas abajo del dique transversal (m).

- Para el cálculo del caudal a transitar por las escotaduras (Q), se estimará mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_r S \sqrt{2g} h_o^{3/2} \quad (3.33)$$

$$\mu_r = \frac{h_u}{h_o} \quad (3.34)$$

Donde:

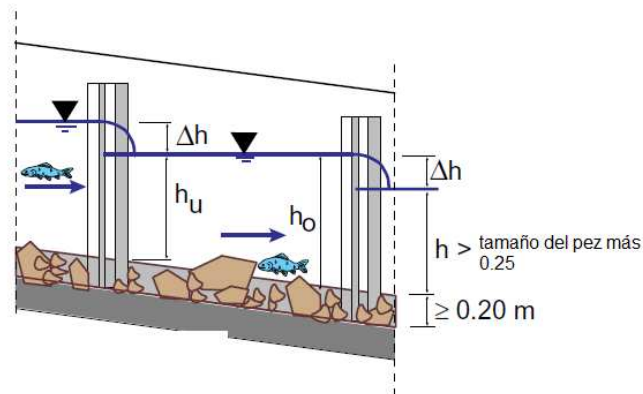
h_o : Altura medida desde el sustrato hasta el nivel del agua en el estanque de arriba (m).

μ_r : Coeficiente de descarga adimensional

h_u : Altura media del nivel de agua en el estanque de abajo, tamaño del pez más 0,25 m mínimo (m).

S : Ancho de la escotadura (m)

g : Aceleración de la gravedad de la tierra (m)

FIGURA 3.32 ESQUEMA GENERAL DE LA SECCIÓN DEL DISPOSITIVO.

Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- La energía disipada (Potencia, E), en una estanque con escotaduras verticales deberán ser menor a 200 W/m^3 , la cual será calculada con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho g \Delta H Q}{b h_w (l_b - d)} \quad (3.35)$$

$$h_w = h_u + \frac{\Delta H}{2} \quad (3.36)$$

Donde:

A : Área del estanque (m^2)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

h_w : Profundidad media para un estanque (m)

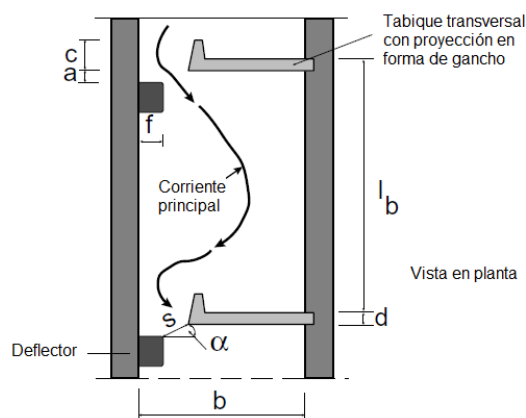
Q : Caudal total circulante (m^3/s)

d : Espesor del tabique (m)

l_b : Longitud del estanque (m)

- La disipación de energía en los estanques formados tendrán que ser menores $E = 200 \text{ W/m}^3$ (Larinier, 1992).
- Las dimensiones mínimas de la escotadura tendrán que ser $s = 0,15$ a $0,17$ m, $l_b = 1,90$ m y $b = 1,20$ m, cuando existan dos ranuras en el tabique el ancho del estanque deberá ser duplicado (Gebler 1991).

FIGURA 3.33 ESQUEMA DEL DISPOSITIVO DE PASO DE ESCOTADURAS VERTICALES



Fuente: Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

TABLA 3.4 DIMENSIONES MÍNIMAS PARA LOS DIFERENTES TAMAÑOS DE PECES CALCULADO PARA $\Delta H = 0.20 \text{ m}$

VARIABLES	SIMBOLOGÍA	DIM.	Tamaño de los peces (L_c)		
			Menores a 0.30	0.70 - 0.30	Mayores a 0,70
Anchura de la escotadura	s	m	0.15 – 0.17	0.30	0.60
Ancho de estanque	b	m	1.20	1.80	3.00
longitud de estanque	lb	m	1.90	2.75 – 3.00	5.00
longitud de proyección	c	m	0.16	0.18	0.40
Distancia alterna	a	m	0.06 – 0.10	0.14	0.30
Ancho del deflector	f	m	0.16	0.40	0.84
Diferencia del nivel de agua	ΔH	m	0.20	0.20	0.20
Mínima altura de agua	hmin	m	0,25+ L_c	0,25+ L_c	0,25+ L_c
Required discharge	Q	m ³ /s	0.14 – 0.16	0.41	1.40

Fuente: Fish Passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002

- Caudal de paso a través de las escotaduras, determinado por la siguiente expresión:

$$Q = C_d \cdot b \cdot H \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta h) \quad (3.37)$$

Donde:

Q : Caudal de paso a través de las escotaduras (m³/s)

C_d : Coeficiente de descarga (adimensional)

b : Anchura de la escotadura (m)

H : Diferencia existente entre la lámina de agua, aguas arriba de la escotadura y aguas abajo de la misma.

Δh : Diferencia de cota entre estanques

g : Gravedad

- Coeficiente de descarga debe encontrarse entre los valores: 0.65 a 0.85 (Larinier 1992).
- Pendiente de paso no debe ser excesiva, debido a que puede provocar perturbaciones en el comportamiento de los peces.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizará de una forma objetiva la diferente problemática que puede tener la teoría antes expuesta en conjunto con panoramas más estrictos en condiciones desfavorables que se presentan en los ríos ecuatorianos, así como también se estudiará las bases de una forma crítica, entregando soluciones técnicas y objetivas que puedan ser de ayuda para el correcto diseño de un dispositivo de paso.

Los factores hidrológicos, hidráulicos, topográficos, biológicos serán estudiados en este capítulo los mismos que se relacionarán con el estudio de las capacidades natatorias del pez, el análisis de dispositivo de paso y como texto de ayuda al lector se redactará una síntesis de la situación actual del medio fluvial y acuático en el Ecuador.

4.2. ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES FACTORES EN LA IMPLANTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE PASO

En la instalación de un dispositivo de paso existen numerosos factores a tomar en cuenta para la implantación de estos dispositivo en los ríos, de los cuales se puede analizar diferentes parámetros medioambientales que influyen directamente en la eficacia de los dispositivos de franqueo, entre estos tenemos: parámetros de calidad de las aguas, temperatura, ruido, olor, oxígeno disuelto, etc., que se pueden convertir en disuasorios. Sin embargo, la influencia de la mayor parte de estos parámetros sobre el comportamiento de las especies migradoras está mal documentada, por lo que resulta difícil determinar unos valores y criterios para el dimensionamiento (Larinier, 1998).

Estos factores conllevan a que se realicen varios estudios relacionados con la morfología del cauce, cabe mencionar que la diferencias morfológicas existentes entre los ríos, están relacionados estrechamente con las condiciones de hábitat,

ya que las diferencias físicas se traducen en diferentes condiciones ambientales, como por ejemplo, oxigenación de los ríos y velocidad de flujo, pendiente, etc., por lo que se requerirá un estudio de los organismos acuáticos del río señalando las especies migratorias, temporadas de desove y capacidades físicas del pez.

Para la construcción de un paso hay que tener presente los siguientes factores:

4.2.1. BIOLÓGICOS

- Selección de la especie objetivo
- Identificación del período de migración, de la especie acuática en su respectivo sitio de estudio
- Determinación de las diferentes capacidades atléticas del pez como son: la velocidad de nado y capacidad de salto
- Necesidades biológicas, entre ellas la profundidad mínima a la que podría llegar el pez
- Distancia máxima recorrida
- Capacidad de nado y salto del pez
- Distintos ciclos biológicos por parte de la especie acuática
- Preferencias de las distintas especies en cuanto a luminosidad y temperatura.
- Especies migradoras presentes en el curso de agua, ciclos biológicos

4.2.2. HIDRÁULICOS

- Caudales circulantes en el período de migración de la especie objetivo
- Estimación de la situación hidráulica, para dichos caudales circulantes:
 - Velocidad de flujo del río
 - Profundidad
 - Saltos hidráulicos a generarse
- Estudio previo de las variaciones de caudal, a la salida del dique transversal con las diferentes condiciones adversas de crecimiento de caudal y arrastre de sedimentos presentados, cuidando las estructuras hidráulicas de tal forma, para que los peces ingresen, sin sufrir la mayor cantidad de daños físicos.

- Variaciones del calado en el paso de peces
- Nivel de turbulencia, pendientes, geometría del paso
- Pendientes en el cauce
- Patrones de flujo y recirculación
- Geometría del dispositivo de paso
- Disipación de energía
- Presiones presentadas en el flujo de agua
- Erosión local presentada al pie del dispositivo

4.2.3. HIDROLÓGICOS

- Características hidrológicas de la cuenca
- Niveles de agua
- Variaciones estacionales del caudal como estiajes, deshielos, etc
- Mantenimiento de los caudales ecológicos
- Uso de los recursos hídricos

4.2.4. TOPOGRÁFICOS

- Batimetría del lecho
- Situación de la obra
- Erosión local en el pie del dispositivo
- Desnivel a superar (obstáculo)

Una vez conocidos todos los condicionantes anteriores, serán las condiciones hidrodinámicas creadas las que mayor importancia tengan en la eficacia de los dispositivos.

4.3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA Y MORFOLÓGICO DEL RÍO

4.3.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA

De los factores nombrados anteriormente que influyen en la implantación de un dispositivo de paso algunos de estos se analizan con un estudio de la hidrología

de la cuenca donde se encuentra ubicado el río, entre estos están los caudales máximos y mínimos, precipitaciones y tiempos de estiaje, escorrentía, evapotranspiración, niveles de agua y caudal ecológico.

El estudio de caudales presentes en el río no es uno de los objetivos de esta tesis pero estos datos son necesarios para el correcto dimensionamiento de los dispositivos de paso de caudal ecológico, los cuales pueden ser calculados por diferentes métodos conocidos.

El establecer el caudal ecológico ya se indicó en el capítulo dos de la presente tesis en donde se señala la utilización de la diferente metodología para el cálculo del caudal ecológico, se tendrá presente que este caudal es el mínimo que debe usarse para la conservación de los ecosistemas sea que este en temporadas de poca precipitación o estiaje, si no puede ser sustentado este caudal, se tendrá que recurrir a otros métodos como el de inyectar caudales extras al río.

4.3.2. EL ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL RÍO

Un correcto estudio morfológico se refiere a definir la configuración geométrica del cauce tanto para la implantación del dispositivo de paso, como para cualquier tipo de canal y poder relacionarlos con la hidráulica de los ríos, así también tener una idea de cómo se encuentran ubicados los peces en los cauces según el comportamiento y su posible localización, de manera que nos ayudaría a tener un mejor funcionamiento del dispositivo.

El estudio topográfico para la implantación del dispositivo nos indica la correcta posición de este en el sitio, para que el pez pueda superar el dique transversal, pero en sí debemos de tener en cuenta la variabilidad geométrica que tiene un cauce, lo que produce que en estos estén actuando diferentes parámetros producidos directamente a la dirección de flujo del río, que afectarían la correcta ubicación y funcionamiento así como el desenvolvimiento del pez en el sector donde se encuentra ubicado el dispositivo de paso.

Entre las características producidas por el escurrimiento del río que afectarían directamente al dispositivo están:

- Las características físicas del escurrimiento de los ríos como, velocidad y pendiente.
- Las características de arrastre de materiales, erosión y socavación, como también profundidad del escurrimiento en el cauce.

4.3.2.1. Pendiente del cauce

Las pendientes varían principalmente con el caudal y las características fisiográficas, se caracteriza por disminuir a los largo del recorrido del río por lo que se asocia un aumento del gasto concluyendo de tal manera que la pendiente (I) disminuirá al aumentar el caudal del río, para su cálculo se propondrá usar esta ecuación (Alberta, Bray en 1973).

$$I = 0.003634 M^{0.38} Q_m^{-0.32} \quad (4.1)$$

Donde

Q_m : Caudal medio anual.

M : Porcentaje del sedimento transportado en el río.

La pendiente del río será uno de los indicadores principales cuando se simula un paso naturalizado o río artificial como dispositivo de transporte de caudal ecológico, ya que estas recorren grandes longitudes hasta seguir con la continuidad del río. Se ve necesario seguir el mismo patrón de pendiente de ésta sección en el cual se implantará el dispositivo, cuando se utiliza el río naturalizado como dispositivo de paso de caudal ecológico.

El estudio de la pendiente del cauce es una de las variables que determina mayoritariamente la expresión de los ecosistemas acuáticos y el desarrollo de usos antrópicos diversos. Por esta razón los organismos acuáticos se desarrollan principalmente, en lugares donde existe disminución en la pendiente o la presencia de un ensanchamiento lateral del cauce, en estos lugares se produce hábitats favorables para los organismos acuáticos. En ríos que tengan características como plataformas litorales, meandros y zonas trenzadas, son los más favorables para el desarrollo de la flora y fauna acuática, en particular para los peces nativos. En cambio, para ríos ritrónicos con bajo caudal y pendiente, el

criterio que permite mantener las poblaciones de especies acuáticas puede ser la mantención de la secuencia de pozas y rápidos

La pendiente constituye un elemento importante en el efecto del agua al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere el río y la erosión que produce por lo que se analizara cuidadosamente los efectos que produce en el río y producirá sobre el dispositivo debido al arrastre de sedimentos.

4.3.2.2. Velocidad de flujo

Es la rapidez con la que el agua se desplaza por el cauce, medido en cualquier punto. Debido a los rozamientos con el lecho del río y las márgenes, la velocidad varía entre un valor próximo a cero y un máximo situado en la mitad del tipo de flujo de agua a presentarse y a cierta distancia del fondo del lecho.

Cuando el cauce es homogéneo, el movimiento de los caudales es lento y los hilillos de agua se deslizan unos sobre otros, se habla de **flujo laminar**. Si por el contrario el cauce es rugoso y la velocidad alta, el paralelismo de las líneas de agua se rompe y entrecruzan, es el **flujo turbulento**, la relación que tiene estos tipos de flujos con los organismos acuáticos en los ríos es que estos prefieren trasladarse por donde existen aguas tranquilas o por donde el flujo presente un movimiento uniforme, ya que las aguas turbulentas ocasionan desorientación y mucha confusión en los peces u organismos acuáticos.

Una morfología con grandes pendientes implica velocidades altas, estas velocidades deberán ser medidas aguas arriba del dique transversal como también aguas abajo del dique transversal ya que la velocidad cambia por la presencia de estos obstáculos, la velocidad que tenga el flujo de agua influirá en el traslado y distancia recorrida por el pez lo que nos indica realizar un estudio previo de las capacidades natatorias de las especies acuáticas presentes con relación a las velocidades del flujo para que este sea un indicativo de cómo llega el pez al dispositivo de paso.

Las velocidad (V) que tenga el flujo de agua influirá en el traslado y distancia recorrida por el pez lo que nos indica realizar un estudio previo de las capacidades natatorias de las especies acuáticas presentes con relación a las

velocidades del flujo para que este sea un indicativo de cómo llega al pez al dispositivo de paso.

En el movimiento de aguas intervienen la fuerza de gravedad y la de fricción, la interacción de estas dos fuerzas determina la capacidad de erosión y transporte de los sedimentos, por lo que se debe entender que velocidades altas muy comunes en ríos de alta montaña, van a producir erosión y sedimentación en el dispositivo.

La velocidad del agua que se desliza en un flujo de agua, está determinada por varios factores entre estos tenemos:

4.3.2.2.1. La gradiente o la pendiente

La velocidad del flujo aumenta cuando la pendiente es más pronunciada.

4.3.2.2.2. La rugosidad

El contacto entre el agua y los márgenes de flujo causa una resistencia (fricción) que depende de la suavidad o rugosidad del canal.

4.3.2.2.3. Forma

Los canales pueden tener idénticas áreas de sección transversal, pendientes y rugosidad, pero puede haber diferencias de velocidad de flujo en función de su forma.

Todas estas variables se las puede unir en una sola ecuación empírica conocida como la formula de Manning.

$$V = 1/nR^{2/3}I^{1/2} \quad (4.2)$$

n : Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)

R : Radio hidráulico (dependerá de la morfología y el criterio del calculista); (m)

I : Pendiente media del canal (m/m)

En sentido estricto, el gradiente de la superficie del agua debería utilizarse en la fórmula, se sugiere calcular una media de gradiente del canal a partir de la

diferencia de elevación entre varios conjuntos de puntos situados a 100 m de distancia entre ellos.

El cálculo de la velocidad del flujo de agua se puede determinar mediante la metodología descrita en los libros de hidráulica fluvial.

4.3.2.3. Profundidad de flujo

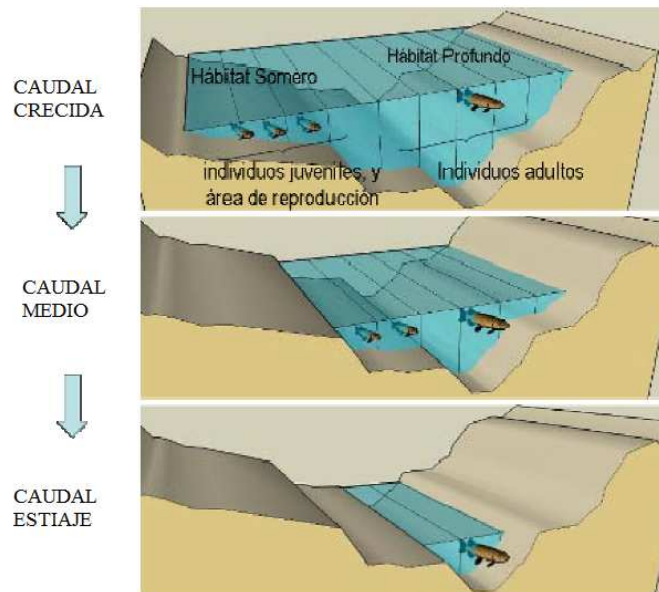
La variabilidad de las secciones transversales y verticales de flujo del río se relaciona con los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en un río. La velocidad de flujo en el sitio, la altura y el tipo de sustrato determinan los niveles de turbulencia, que a su vez se encuentran en relación con las condiciones de hábitat del sitio de las especies acuáticas, los procesos de transporte longitudinal de masa, intercambio de masa e intercambio de gases con la atmósfera.

En el eje transversal del escurrimiento es posible encontrar que la velocidad y la profundidad no son constantes, sino que depende estrechamente de la profundidad en el sitio del flujo de agua. En un perfil transversal de un río se puede observar una región con menor velocidad de flujo en bajas profundidades. Este sector donde se encuentra menores velocidades es un hábitat de refugio para las especies acuáticas. No así en la zona central donde se desarrollan las mayores velocidades.

Las modificaciones en la altura de flujo y de su régimen temporal pueden generar la pérdida permanente de los hábitats requeridos por los organismos acuáticos y en particular para los peces nativos, eliminando en forma permanente los hábitats requeridos para la reproducción y mantención de los cardúmenes juveniles.

Es necesario graficar una relación caudal-calado (HEC_RAS), tanto aguas abajo como aguas arriba del dique transversal, para proveer problemas de tránsito del pez, el objetivo de esta tesis no es estudiar los efectos ocasionados por la variabilidad de caudales, sino el de prever los posibles problemas que podrán causar estos en el dispositivo y en el comportamiento de las especies acuáticas.

FIGURA 4.1. VARIACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE HÁBITAT SOMERO EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL.



Fuente: Higginson y Johnston ,1989

4.3.2.4. Arrastre de sedimentos

Por medio del análisis de los modelos de arrastre de sedimentos, se puede obtener una relación útil para estimar las condiciones en que se produce un lavado del fondo del río.

Este arrastre ocasionará un aumento de sedimentos en las estructuras como en los dispositivos de paso para peces, además las tipologías de los ríos determinan la cantidad de material arrastrado por el cauce y en sí, se debería calcular mecanismos para eliminar estos sedimentos en los dispositivos. El arrastre de los sedimentos ocasiona daños y obstrucciones en las estructuras provocando el fallo en estos, la fuerza de arrastre (F_D) se podrá calcular según la siguiente ecuación.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \cdot \mu^2 \quad (4.3)$$

Donde:

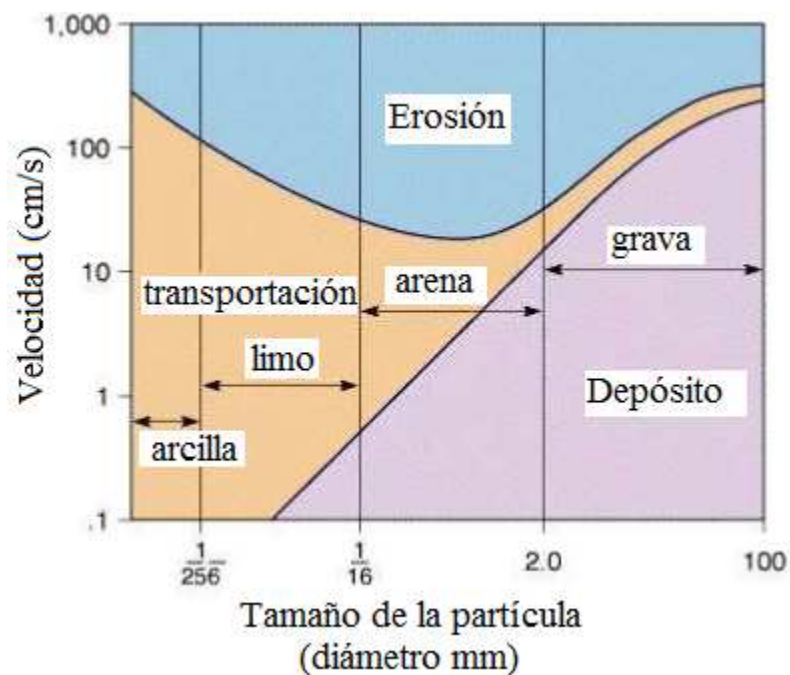
C_D : Coeficiente de arrastre;

ρ : Densidad del fluido;

A : Área de la partícula proyectada en el plano normal a la trayectoria;
 u^2 : Velocidad de escurrimiento

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de Hjulstrom, un gráfico logarítmico del tamaño de la partícula y los rangos de velocidad donde se produce la erosión, transporte y deposición de sedimentos. De acuerdo a los resultados del modelo hidrodinámico, se podrá posteriormente estimar en qué zonas potencialmente existe lavado (arcillas, limo arena, gravas) según las características del sustrato y la velocidad de escurrimiento.

FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE HJULSTROM, QUE RELACIONA LA VELOCIDAD DE ESCURRIMIENTO CON EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS



Fuente: Higginson y Johnston ,1989

Este problema produciría una acumulación de sedimentos como basura, restos vegetales y material flotante en la entrada, salida y en el dispositivo en sí, una solución muy práctica sería el uso de rejillas sistemas de desviación de escombros y en el dispositivo se podría usar la salida de ranura vertical como una forma de mantenimiento en el dispositivo.

4.3.2.5.Erosión en el cauce

La erosión y el depósito de sedimentos son factores que actúan en el dispositivo a largo plazo interviniendo en el correcto funcionamiento de este ya que el caudal circulante aguas arriba produce este fenómeno, el estudio de este fenómeno debe determinar la correcta ubicación de la entrada del dispositivo así como prever los distintos problemas que puedan generarse en el futuro como por ejemplo, la erosión ocasionado deslizamientos del dispositivo y depósito de sedimentos en entrada del pie y la cresta del dispositivo ocasionando un mal funcionamiento ya que este necesita estar en interacción con el fondo del río.

Para un mejor detalle de los problemas a generarse se enunciará en la tabla 4.1. La cual relaciona la forma de transporte de sedimentos con depósito y erosión.

TABLA 4.1. M-PORCENTAJE DE SEDIMENTO TRANSPORTADO.

FORMA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	M%	CON DEPOSITO	CON EROSIÓN
En suspensión del 85 al 100%	100	El principal depósito ocurre en las márgenes que origina el estrechamiento del cauce, el depósito en el fondo es menor.	Predomina la erosión del fondo. Poca ampliación de los márgenes del río.
En suspensión del 65 al 85% y en el fondo del 15 al 35%	30	Es importante el depósito en los márgenes pero también el del fondo.	Es importante la erosión del fondo y la ampliación de los márgenes.
De fondo del 35 al 70 %	< 5	Depósito en el fondo y formación de islas.	La erosión del fondo es mínima, pero la ampliación del cauce es importante.

Fuente morfología de ríos, Jesús Gracia Sánchez, José Antonio Maza Álvarez, Instituto de ingeniería, UNAM, 2001.

4.3.3. ANÁLISIS GENERAL DE LAS CAPACIDADES NATATORIAS DE LOS PECES

Los peces necesitan cumplir con sus respectivos períodos de migración para satisfacer sus necesidades tanto reproductivas como alimenticias, lo cual incita al pez a trasladarse por el río. En el presente análisis se estudiará las capacidades físicas que tiene el pez para cumplir con su objetivo de migración al transitar por el dispositivo de paso.

4.3.3.1. Capacidad de Nado

Tiene como objetivo relacionar la distancia recorrida por el pez en función de su velocidad a través del medio acuático, tamaño y la resistencia del pez, donde a partir de estas dos variables nombradas anteriormente, depende el diseño de todos los tipos de dispositivo de paso para peces. El objetivo final es obtener una curva que nos relacione la distancia que puede recorrer un pez en función de la velocidad del fluido.

4.3.3.1.1. *Velocidad Del Pez a través Del Medio Acuático*

Según la metodología y criterios en la determinación de las velocidades de natación del pez a través del río, dificulta la comparación de los resultados obtenidos por los diferentes autores. Pero se ha estudiado que existen tres principales factores que influyen en las velocidades de natación:

- Especie considerada
- Tamaño del pez
- Temperatura del agua.

a) TIPOS DE VELOCIDAD DE NADO

- VELOCIDAD DE CRUCE (Hudson 1973, Webb 1975)

Se define como la velocidad que puede mantener el pez durante una hora, siendo para esto necesario que el pez active sus músculos aerobios (musculatura roja, Larinier 1998), realizado cuando no hay limitación de oxígeno en las células del pez.

- VELOCIDAD MÁXIMA

Se define como la velocidad que puede mantener el pez durante un período corto de tiempo, para esto el pez activa sus músculos anaerobios (musculatura blanca, Larinier 1998), aquí el pez realiza ejercicios anaerobios, donde sus músculos se contraen con velocidad y mayor potencia, cuando existe falta de oxígeno.

Para poder adquirir esta energía el pez, lo hace mediante el consumo de glucógeno, donde lamentablemente lo puede mantener durante corto tiempo, debido a que se agota el glucógeno, tardando hasta 24 horas para recuperar su capacidad de nado inicial.

Siendo la velocidad máxima, directamente proporcional a tamaño de la especie acuática (Larinier 1998).

b) Estimaciones en el cálculo de la velocidad de nado

Se han establecido velocidades máximas del orden de 10 veces la longitud del pez por segundo (Blaxter 1969). La velocidad máxima de nado es proporcional a la frecuencia máxima de trabajo de la aleta de la especie acuática. La velocidad propuesta por Wardle en 1975 en base a experimentaciones, se las puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$V_n = \frac{0.7 L.C.}{2t} \quad (4.3)$$

Donde:

t : Tiempo mínimo entre dos contracciones musculares

Lc : Tamaño del pez

La temperatura y el tamaño del pez separan las contracciones musculares sucesivas ya que a mayor temperatura, disminuye el tiempo mínimo de contracción y por lo tanto aumenta la velocidad (Zhou 1982).

Las especies de peces como el salmón y la trucha han sido los más estudiados, por su comportamiento migratorio y porque a diferencia de otras especies, la pesca representa una actividad comercial suficientemente importante como para

que simplemente los factores económicos hagan necesario los estudios de estas especies.

De acuerdo a las distintas experimentaciones hechas por Larinier en 1998, se han obtenido las siguientes velocidades máximas para el salmón y la trucha:

- Salmón: 6 – 8 m/s
- Trucha: 3 – 4 m/s

Crowx en 1998, igualmente en base a experimentaciones y observaciones, llegó a determinar las velocidades máximas y de cruce mediante las siguientes expresiones:

- $V_{m\acute{a}xima}: 10 \text{ L.C.}/t$
- $V_{cruce}: 2 \text{ L.C.}/t$

Dependiendo obviamente del tamaño de la especie normalmente encontrados en ríos de alta montaña, se han llegado a determinar las siguientes velocidades de cruce para el salmón y la trucha (Blaxter 1969):

- Salmón: 2 – 3 m/s
- Trucha: 0.5 – 1 m/s

4.3.3.1.2. Resistencia del pez

La resistencia del pez depende de la velocidad que éste mantenga durante el recorrido, este cálculo ayudaría a estimar la distancia que el pez pueda recorrer con una velocidad constante antes de llegar al punto de fatiga. Se la puede definir como, tiempo en el cual el pez es capaz de mantener la velocidad máxima de nado (Larinier 1998).

a) Estimaciones en el cálculo de la resistencia

Se basa en expresiones empíricas, fundamentadas en la energía química almacenada, fuente principal de energía para los distintos movimientos anaeróbicos realizados por el pez (Zhou 1982).

La resistencia se puede determinar de acuerdo al tiempo de permanencia que el pez pueda soportar a una velocidad máxima.

Donde el tiempo de permanencia a una velocidad máxima se encuentra determinada mediante la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{E}{P_r - P_s} \quad (4.4)$$

Donde:

E: Energía total almacenada

P_r : Potencia requerida para nadar a una determinada velocidad

P_s : Potencia suministrada por la musculatura del pez

Además más desarrollada también el tiempo de permanencia se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{1970 \times 10.836 \times L^{2.964}}{(0.9751 \times e^{-0.0052t} \times V^{2.8} \times Lc^{-1.15}) - (4.44 \times 10.836 \times Lc^{2.964})} \quad (4.5)$$

Donde:

Lc : Tamaño del pez en metros

T: Temperatura del agua en °C

V: Velocidad máxima del nado del pez

Después de calcular el tiempo de permanencia, se puede estimar la distancia recorrida por el pez con dicha velocidad con las ecuaciones de la física newtoniana.

4.3.3.1.3. Distancia recorrida del pez

Se define como la distancia recorrida por el pez en cada oscilación en un tiempo determinado, donde en este tiempo el pez recorre una trayectoria con las diferentes velocidades de nado, que son nombradas a continuación.

Estimaciones en el cálculo de la distancia recorrida

- Wardle en 1975, experimentalmente demostró que la distancia recorrida por el pez en cada ondulación es 0.7 veces la longitud del cuerpo del pez (L.C.)
- Larinier en 1998, llegó a determinar una expresión de la distancia recorrida por el pez, en base igualmente a experimentación, descrita a continuación donde supone una velocidad de agua constante.

$$d_r = (V_n - V_a) \times t_p \quad (4.6)$$

Donde:

V_n : Velocidad de nado

V_a : Velocidad del agua

t_p : Tiempo de permanencia

4.3.3.2.Capacidad de salto

Es la capacidad intrínseca del pez, que se produce cuando este salta afuera del agua, debida a la presencia de un dique transversal o por una elevada velocidad de agua presente.

FIGURA 4.3. ILUSTRACIÓN DEL SALTO DE UN PEZ



Fuente: Universidad Politécnica De Madrid, Estudio para la mejora hidráulica y adecuación ambiental de los aprovechamientos del río Eria a su paso por el T.M. de Torneros de la Valderia (León), Antonio Morán González, Julio 2009.

4.3.3.2.1. Metodología o principio utilizado para determinar el salto del pez

El salto del pez, se basa en el principio fundamental del movimiento parabólico comúnmente aprendido en la física elemental, expresada por la siguiente ecuación:

$$Y = -\frac{g}{2V_o^2} X^2 + \frac{V_o^2}{2g} \quad (4.7)$$

Donde:

Y : Altura vertical del pez

g : Gravedad de la tierra

V_o : Velocidad con la que el pez sale del agua

X : Alcance horizontal del pez

Partiendo de los principios fundamentales, del movimiento parabólico, se podría llegar a determinar el alcance máximo por parte del pez, que sería cuando este alcanza una altura máxima y un alcance horizontal máximo, descrito a continuación:

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{V_o^2 \text{Sen}^2 \theta}{2g} \quad (4.8) \quad X_{m\acute{a}x} = \frac{V_o^2 \text{Sen}^2 \theta}{g} \quad (4.9) \quad \text{Solo Para } \theta = 45^\circ$$

La Velocidad inicial V_o con la que el pez sale del agua corresponde a la máxima velocidad que puede mantener durante 2-3 segundos. La obtención de la velocidad se realiza mediante el uso de las figuras 5.1, 5.2 y 5.3, expuestas en el capítulo siguiente.

Donde $X_{m\acute{a}x}$ y $Y_{m\acute{a}x}$, se deben encontrar en función del ángulo de salida del pez, el cuál debe ser de 45° , para tener este caso ideal, claramente tomando en cuenta que no se asume fuerzas de carácter conservativo, como la de rozamiento existente.

4.4. ANÁLISIS EN LA CONCESIÓN DE CAUDAL CIRCULANTE QUE TRANSITARA POR EL DISPOSITIVO DE PASO.

4.4.1. USO DEL CAUDAL ECOLÓGICO COMO CAUDAL CIRCULANTE

El caudal ecológico en base a lo estudiado y analizado en el capítulo 2, se hace de vital importancia para los diferentes diseños de los dispositivos de paso, donde se ha tomado como especie principal al pez, ya descrito en la introducción del capítulo anterior, debido a las siguientes razones:

- Asegura el régimen hidrológico natural del río, asegurando la biodiversidad acuática.
- Permite una adecuada gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica a ser analizada.
- Asegura la supervivencia y la reproducción siguiente de la especie, ya que las estimaciones de caudal ecológico por medio de las diferentes metodologías estudiadas en el capítulo 2, son destinadas al cálculo en si del caudal ambiental, debido a esto si se asegura el caudal ambiental por consiguiente ya está asegurado el caudal ecológico, ya que tiene un alcance menor al caudal ambiental.
- Permite la conservación de especies en peligro y además maximiza la producción de especies comerciales, brindando una fuente de alimentación para la población.
- Permite conocer la cantidad de agua que se puede extraer de un río, sin pasar de los niveles que degradan el ecosistema.
- Permite tener flujos estables, asegurando un adecuado funcionamiento del dispositivo, además de buenas capacidades natatorias por parte de las especies acuáticas (peces).
- Asegura adecuadas migraciones por parte de las especies acuáticas (peces) en sus respectivos períodos.
- Asegura la continuidad de la vida acuática y de los ecosistemas aguas abajo del dique transversal.

Por todas estas razones se hace de vital importancia, tomar al caudal ecológico como caudal de diseño y tránsito de los diferentes dispositivos de paso.

4.4.2. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON EL DISPOSITIVO DE PASO.

Es de vital importancia la necesidad de que el caudal ecológico, siempre se encuentre transitando por el dispositivo, en las diferentes circunstancias que podrían presentarse, para esto se necesita que se cumplan los siguientes aspectos, citados a continuación:

- El caudal ecológico que esté presente en el dispositivo, se encuentre entre el 15 y el 30 % del caudal medio anual, tomado del dique transversal.
- Muchas veces especialmente en períodos de estiaje, ocurre que los caudales presentados en el dique transversal disminuyen, afectando directamente al funcionamiento del dispositivo ya que el valor de caudal ecológico transitante, sería mucho menor, produciendo un secamiento de agua en el dispositivo, y por consiguiente una mala funcionabilidad del dispositivo, además de el estancamiento y mortalidad de peces, para esto es necesario la inyección de caudal, la cual puede ser por medio de métodos manuales o automatizados, asegurando que siempre transite el caudal ecológico por el dispositivo.
- Se debe procurar en tiempos de crecidas, también el cumplimiento del valor del caudal ecológico transitante por el dispositivo, ya que al no cumplirse este valor, se podrían producirse desbordamientos y variabilidad de niveles afectando al funcionamiento del dispositivo además de valores altos de velocidad, produciendo mortandad y choques entre los peces, y con esto una mala funcionabilidad del dispositivo, además de socavaciones y aumento de sedimentos, los cuales además obstruirían el paso de los peces en la entrada y salida del mismo, por lo que una solución conveniente sería el diseñar una estructura de descarga de caudal excesivo tanto en el dispositivo como en el dique transversal.
- Un diseño adecuado del dispositivo garantizará la disipación de energía para eliminar problemas de turbulencia que pueda afectar al pez, esta

disipación de energía depende mucho del caudal que circula ya que se calcula para un caudal en nuestro caso el caudal ecológico y se tendría inconvenientes si existe un exceso en el aumento de caudal por el dispositivo.

4.4.3. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON LAS CAPACIDADES DE FRANQUEO DEL PEZ.

El propósito de esta tesis es establecer las bases para que el dispositivo pueda transportar el caudal ecológico, lo que conlleva a que el caudal circulante por el paso tenga como regla satisfacer las necesidades ecológicas aguas abajo como también el libre paso de los peces y la supervivencia de las especies, es por este motivo que se requiere de un análisis para determinar los problemas que puede tener el pez en su migración al transportarse por el caudal ecológico propuesto. Para que el pez pueda franquear un tipo de flujo de agua en contracorriente, éste deberá ser capaz de desarrollar una velocidad de natación superior a la del agua, durante un tiempo suficiente para superar el dique transversal, o bien, en el caso de que éste no pueda ser sobrepasado nadando, realizará un salto lo suficientemente alto y largo para evitarlo.

Entre los diferentes problemas tenemos:

- **Velocidad del flujo en el paso.-** En la teoría analizada se establece que el caudal circulante no puede transitar por el paso con una velocidad máxima de 2,00m/s para todo tipo de dispositivo ya que el pez podría ser arrastrado por la dirección del flujo de agua, por lo que se analizará la velocidad en la que el pez puede nadar de acuerdo a la metodología que se propone en la presente tesis.
- **Calado necesario para que las especies grandes de peces puedan transitar por el paso.-** Lo que se propone es que el Caudal ecológico y el pez rijan las dimensiones del dispositivo de paso, para asegurar que el flujo tenga un calado suficiente en el dispositivo, para que el pez pueda transitar sin dejar de observar el problema de ocasionar un aumento de velocidad en el dispositivo y afectar la migración del pez.

- **La turbulencia creada por el tránsito del caudal en el dispositivo.-** El tránsito del caudal en el dispositivo ocasiona turbulencia en muchos de los dispositivos que utilizan sistemas de disipación de energía, como tabiques, generalmente esta turbulencia causa desorientación en el pez impidiendo su correcta migración, la forma de solucionar este problema es el mismo dique transversal correctamente ubicado, el cual servirá para el descanso y protección contra el tipo de flujo de agua, un mal diseño del tabique ocasionará fallas en el dispositivo.
- **Desechos y obstáculos.-** El caudal que circula por el dispositivo transporta materiales de desechos orgánicos y rocas, lo que ocasiona lesiones en los peces los cuales les resulta imposible de franquear por la velocidad que estos llevan y por obstrucciones en el paso, ocasionando la posterior falla del dispositivo. Se analizará en la presente tesis, como mantener libre de desechos y rocas a los diferentes dispositivos, por medio del uso de dispositivos de franqueo para dichos materiales.

Muchos de estos problemas presentados se pueden solucionar con un correcto estudio de las capacidades de nado del pez así como también un correcto diseño hidráulico del dispositivo de paso, en la presente tesis se indica la utilización de disipadores de energía, obstrucciones como piedras y rejillas de control de desechos las cuales son una solución muy acogida para ayudar al pez en su migración.

4.5. ANÁLISIS GENERAL DE LOS DIFERENTES OBSTÁCULOS PRESENTES EN LOS RÍOS

Entre los objetivos más importantes de este proyecto de tesis, está el de diferenciar los distintos obstáculos, a presentarse en el curso natural de un río con las consecuencias que estos podrían causar en el flujo natural del río y en la fauna acuática existentes en el sitio donde este se encuentra.

Para un correcto diseño de un dispositivo de paso de peces es necesario conocer todos los factores influyentes en el obstáculo, como los desniveles producidos en el obstáculo de los cuales necesitamos conocer la cota del nivel de agua aguas

abajo de la estructura y la cota del nivel agua arriba sobre la rasante del azud, muchos de estos obstáculos disponen en su estructura dispositivos de descarga como de toma de agua, lo que hace más interesante su análisis.

4.5.1. EFECTO BARRERA DE LOS OBSTÁCULOS

Los diferentes obstáculos como presas, azudes, diques y otros artificiales de menor envergadura, producen efectos negativos en la ictiofauna, de los cuáles se puede identificar en la siguiente tabla, tres grupos de efectos que se dan lugar en el río.

TABLA 4.2. EFECTO BARRERA PRODUCIDO POR LOS OBSTÁCULOS

	UBICACIÓN DEL EFECTO BARRERA		
	Efectos producidos aguas arriba	Efectos producidos aguas abajo	Efecto producido en el propio obstáculo
EFFECTOS PRODUCIDOS POR EL OBSTÁCULO	Producen una disminución de especies acuáticas, debido a que el comportamiento natural de estas es influenciado por las aguas en movimiento. También influyen en factores como la falta de oxígeno y temperaturas inadecuadas, ocasionando la pérdida de sectores estratégicos de peces en donde se ocultan de depredadores y realizan el desove.	Tienen como principal consecuencia negativa la regulación de caudales, alterando el régimen natural del río, algunos de estos obstáculos provocan cambios de nivel, e incluso ocasionan un vacío entre el río y la entrada del dispositivo por la escasez aguas abajo del obstáculo, generando mortandad de las especies acuáticas.	La presencia del obstáculo dificulta los movimientos naturales del río a lo largo del curso fluvial, limitando e impidiendo los diferentes movimientos de dispersión y colonización, así como también los movimientos migratorios de los peces, además de impedir la libre circulación de los desechos y sedimentos, ocasionando taponamientos con una consecuencia inminente de la contaminación del río.

Fuente: Estudio teórico de pasos de peces y desarrollo de una Metodología de evaluación de su eficacia por Borja Trapote Varona, (España 2009).

Elaborado por: Daniel Tarambis y Danny Rojas.

4.5.2. ANÁLISIS DE LA UTILIDAD DEL OBSTÁCULO

En este análisis se ha determinado dos fines de la utilidad del obstáculo, ya que su principal utilidad es el de embalsar y retener fluido, con el propósito de extraer y aprovechar la fuerza hídrica.

Estos fines se diferencian en mucho con relación al caudal circulante y la continuidad del flujo del río, ya que el extraer significa tomar un tanto por ciento de

caudal con otros fines de consumo como agua potable o riego, ocasionando disminución en el caudal aguas abajo, lo que significaría que se tendría que calcular del caudal que no es extraído, un tanto por ciento para el caudal ecológico, en cambio el fin de aprovechamiento de la fuerza hídrica es el de utilizar el recurso hídrico con fines de generación hidroeléctrica, por lo que el caudal vuelve a circular por el río aguas abajo.

Estos objetivos de obstáculo ocasionan problemas para los ecosistemas aguas abajo del obstáculo, como disminución del calado ocasionando que los peces no puedan migrar aguas arriba.

4.5.3. RIESGOS PARA LA FAUNA ACUÁTICA CAUSADA POR LOS DIFERENTES OBSTÁCULOS

Las principales fuentes de peligro para los peces son los siguientes:

a) La intervención del ser humano en los biotopos acuáticos son:

- La contaminación del agua a través de aguas domésticas e industrial descargas de aguas residuales, escorrentía de agricultura (fertilizantes, pesticidas, erosión), y emisiones a la atmósfera (SO₂, lluvia ácida, etc.).
- Cambios en la morfología de canal que conducen a degradación del medio ambiente o la destrucción de los hábitats.
- La interrupción de la conectividad longitudinal causado por obstáculos infranqueables.

De los siguientes factores expuestos anteriormente se puede decir que más del 80% de las especies que pueden estar en peligro son las migratorias ya que estas especies demandan más oxígeno que otras (BENDIGA et al., 1994). Así, una de las amenazas más críticas para estas especies es la construcción de represas u obstáculos como sistemas de captación y embalse de agua en los ríos. Estos obstáculos, sin duda, alteran la hidráulica y propiedades morfológicas del río

b) Amenazas a la biocenosis acuática (LWA, 1992):

- Las mayores secciones transversales de la embalses detrás de diques y presas reducen significativamente la velocidad de flujo y la variabilidad de flujo.
- Aumento de los sedimentos finos en el embalse que cubre el sustrato grueso de manera que el mosaico original de diferentes tamaños de grano se altera.
- Flujo a través de los intersticios de los sustratos, y por lo tanto la disponibilidad de oxígeno, es reducido.
- La temperatura del agua aumenta debido a la reducción del flujo
- La deficiencia de oxígeno puede ocurrir en el embalse debido a que el agua se calienta y reduce la turbulencia.
- Reducción de la velocidad de flujo en el embalse junto con una mayor afluencia de nutrientes en las aguas favorecer el crecimiento de las plantas acuáticas a menudo dando lugar a floraciones de algas o excesivo crecimiento de malezas.

Todos estos problemas causados por obstrucciones como represas, captaciones, embalses etc. afectan directamente a la fauna acuática y concierne buscar una solución para tratar este problema.

4.6. ANÁLISIS GENERAL DEL DISPOSITIVO DE TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.

En un dispositivo de tránsito de caudal ecológico podemos distinguir tres grandes componentes: la entrada aguas abajo, el dispositivo propiamente dicho y la salida aguas arriba, siendo de vital importancia la entrada ya que asegura la entrada y el paso de los peces por medio del dispositivo, con su respectivo franqueo aguas arriba del obstáculo, a continuación en base al análisis se aporta algunas recomendaciones en los dispositivos de paso.

4.6.1. ANÁLISIS EN LA ENTRADA DEL DISPOSITIVO

En el capítulo 3, se citó las distintas condiciones necesarias para la entrada del pez en el dispositivo, resultando de forma eficaz y completa la explicación dada, para que un paso resulte realmente eficaz es necesario analizar la sección de entrada del dispositivo en condiciones críticas, para efecto de que el pez no sufra daños o estrés en la búsqueda de la entrada del dispositivo.

4.6.1.1. Entrada del dispositivo y su funcionabilidad en condiciones críticas

De lo analizado anteriormente sobre caudal ecológico, se entiende que es el mínimo caudal que debe circular para proteger y mantener la vida en los ecosistemas, de la teoría explicada anteriormente se diseña un dispositivo de paso, para condiciones óptimas esto quiere decir que existe en el río aguas abajo, un caudal circulante aparte del caudal ecológico, que incrementa el nivel del flujo, y es con el que se va a calcular, tendiendo a un problema en la entrada del dispositivo, ya que no podría cumplir con su funcionabilidad cuando sólo circule el caudal ecológico, esto provoca la falta de calado aguas abajo, ya que los diseños de los dispositivos se encuentran dimensionados para condiciones óptimas, lo que impide que el pez pueda acercarse al dique transversal y perder la conectividad de la entrada del dispositivo con el fondo del río, además se pierde los caudales de atracción e incluso el camino que une el fondo del sustrato hacia la entrada del dispositivo, incluso un problema técnico se presenta en la entrada del dispositivo, se tiene caídas de agua más elevados en la entrada, ocasionando velocidades altas que no serían suficientes para la ascensión del pez, debido a los choques presentes por la ausencia de calado existente en el río, y provocando una alteración en el comportamiento del pez.

En general, los peces prefieren nadar próximos a las riberas con lo que la teoría sugiere la localización de la entrada en las partes laterales del río (Larinier 1998).

A continuación en la tabla 4.3., se presentarán algunas alternativas de solución para los problemas generados en épocas de estiaje.

TABLA 4.3. SOLUCIONES PARA LOS PROBLEMAS GENERADOS EN ÉPOCAS DE ESTIAJE

PROBLEMA	CONSECUENCIAS DEL PROBLEMA	SOLUCIÓN
FALTA DE CALADO AGUAS ABAJO	1.- El Pez no puede acercarse a la entrada del dispositivo debido a que la altura de la velocidad de flujo no permite la navegación del pez hacia la entrada del dispositivo.	Una solución extrema pero técnica es la creación de una canal triangular entre la poza de entrada hasta una longitud considerada pertinente por el diseñador, lo que permite un aumento de calado en el canal y libre tránsito de los peces hacia la poza de entrada.
CONECTIVIDAD DE LA ENTRADA CON EL FONDO DEL RÍO	1.- Pérdida del camino de migración del pez hacia la entrada del dispositivo. 2.- Falta de continuidad natural del flujo entre el río y la entrada del dispositivo.	Para un adecuado funcionamiento de la entrada del dispositivo se hace necesaria la inclusión entre el fondo del río y la entrada del dispositivo de una poza con característica similares a la una piscina.
CAÍDAS DE AGUA PRESENTADO EN LA ENTRADA EN LOS DISPOSITIVOS QUE UTILIZAN SALTOS DE AGUA EN SUS DISEÑOS	1.- Aumento del salto de agua en la entrada ocasiona altas velocidades impidiendo que el pez pueda acceder al dispositivo. 2.- Erosión provocada por la caída de agua en la entrada del dispositivo, provocando una falla temporal de la misma.	Creación de una poza o piscina en la entrada del dispositivo para asegurar la longitud del salto de agua entre el fondo de la entrada y el nivel de agua de la poza

Elaborado por: Daniel Tarambis y Danny Rojas

4.6.2. ANÁLISIS EN EL DISPOSITIVO PROPIAMENTE DICHO

A continuación se citará un análisis y condiciones a cumplirse en el dispositivo propiamente dicho, para garantizar una correcta funcionabilidad y tránsito de peces aguas arriba del dique transversal, garantizando además su migración aguas abajo.

Todo dispositivo de paso debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Permitir el paso sucesivo del 95% de todas las especies de peces que se acercan al dique transversal, tanto aguas arriba como aguas abajo del mismo.

- Operar correctamente con el 95% del rango de condiciones de caudales conocidos, para cada posición del pez.

4.6.2.1. Problemas principales de conservación y mantenimiento

Los dispositivos presentan problemas de mantenimiento y conservación:

- 1) Falta de un servicio de mantenimiento mínimo, que provoca la colmatación por sedimentos de los estanques de las escalas, obturación de los orificios por ramas, hojas, plásticos, etc.
- 2) Graves problemas de conservación: grietas, roturas parciales, en los dispositivos más longevos. Fundamentalmente no por una mala ejecución, sino por una deficiente previsión o ignorancia de los fenómenos de erosión.

4.6.2.2. Aspectos fundamentales a tomar en cuenta para un correcto diseño del Dispositivo de Paso

- Información adecuada de las respectivas características hidrológicas, presentes en el sitio de estudio.
- Tipo de estructura de fondo
- Existencia de sedimentos flotantes o en suspensión
- Presencia de residuos
- Presencia de altos flujos de agua
- Condiciones hidráulicas locales en el río, como: velocidad, profundidad, potencia disipada, turbulencia.
- Rango biológico de las diferentes especies acuáticas

TABLA 4.4. POSIBLES FACTORES CAUSANTES DE UN FUNCIONAMIENTO DEFICIENTE Y SUS POSIBLES SOLUCIONES EN LOS DISPOSITIVOS DE TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

PROBLEMA	CAUSAS	SOLUCIÓN
Ausencia de atracción del pez	<ul style="list-style-type: none"> Mala localización de la entrada del dispositivo. Caudales de atracción insuficientes. 	<ul style="list-style-type: none"> Uso de un canal desde la cabecera del dique transversal hasta la entrada de paso, ayudaría a incrementar la atracción con el aumento de un caudal extra al dispositivo.
Diferencias de niveles	<ul style="list-style-type: none"> Desconocimiento de los niveles de agua en el río. Infra / supra alimentación de la obra 	<ul style="list-style-type: none"> Correcto estudio hidrológico de los caudales mínimos y máximos presentes en el río. Inclusión de un mecanismo automatizado de control de caudales para el correcto control de las compuertas de descarga.
Dimensionamiento defectuoso	<ul style="list-style-type: none"> Volumen reducido en el dispositivo de paso Aireación y turbulencia excesiva Salto entre depósitos elevados Calado insuficiente Desconocimiento del caudal ecológico 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizar las diferentes metodologías para el cálculo del caudal ecológico (Cap. 2) De acuerdo a la altura del dique transversal, determinar una pendiente adecuada para las diferentes tipologías del dispositivo, para que no genere grandes velocidades.
Bloqueo en el dispositivo	<ul style="list-style-type: none"> Falta de protección contra cuerpos flotantes Defectos de mantenimiento Altas variaciones de caudal Entrada muy expuesta 	<ul style="list-style-type: none"> Utilización de rejillas que impiden el libre acceso de materiales no deseados, incluido con un continuo mantenimiento. Utilización de la salida de ranura vertical para evacuación de sedimentos
Errónea migración del pez	<ul style="list-style-type: none"> Desconocimiento de las capacidades natatorias de las especies acuáticas. Mal dimensionamiento del dispositivo 	<ul style="list-style-type: none"> Elección adecuada de una especie objetivo según su tamaño, velocidad y resistencia, presente en la zona, para un correcto dimensionamiento posterior del dispositivo.

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

4.6.3. ANÁLISIS EN LA SALIDA DEL DISPOSITIVO

A continuación se presentarán los distintos problemas a ocasionarse en la salida del dispositivo, por medio de la tabla 4.5. Se indicará una posible solución:

TABLA 4.5. POSIBLES SOLUCIONES EN LA SALIDA DEL DISPOSITIVO

PROBLEMA	CONSECUENCIA DEL PROBLEMA	SOLUCIÓN
Ubicación de la Salida del Dispositivo	Acumulación de material flotante Mala migración del pez a la salida del dispositivo, debido a la desorientación y turbulencia del agua presentadas en la zona	Debe encontrarse perpendicular a la dirección del flujo de agua, procurando con esto no formar zonas de recirculación Evitar que la salida no se encuentre en aguas muy turbulentas
Velocidades de flujo elevadas en la entrada de flujo	Arrastre de los peces después de salir del dispositivo hacia zonas no deseadas como tomas de agua o compuertas de descarga	Incorporación de barreras que separen el dispositivo con el resto de la estructura del dique transversal, impidiendo así la creación de zonas turbulentas.
Vinculación de la Salida del Dispositivo de Paso con el fondo del río	Desorientación del pez provocando alteraciones en el comportamiento del pez, pudiendo ser capturado por organismos predadores después Zonas de creación de socavación en la parte inferior de la entrada del flujo del dispositivo	Creación de una poza o piscina del dispositivo, en conjunto con una rampa de piedra que vaya desde el fondo de la salida del dispositivo hacia el fondo del sustrato del río
Acumulación de material flotante	Taponamiento en la salida, por desechos naturales como: ramas, vegetación, rocas, etc., impidiendo que los puedan salir fuera del dispositivo	Uso de rejillas suficientemente espaciadas, para el paso de peces de mayor tamaño, controlando que la velocidad que pase por las rejillas no sea mayor a 0.4 m/s, ya que de lo contrario se produciría un taponamiento natural en las zona las rejillas

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

4.7. DESCENSO DE LOS PECES EN EL DISPOSITIVO DE PASO

En los diferentes proyectos hidráulicos en los distintos ríos, los ingenieros se han preocupado por el desarrollo de dispositivos de ascenso como solución para la migración de peces, lo que conlleva a un análisis sobre el problema del descenso del pez de aguas arriba a aguas abajo. En el capítulo anterior se citó la migración de peces aguas abajo, lo que con lleva al problema de que en la teoría antes analizada no se acentúa que los dispositivos de ascenso sirvan también para el descenso del pez, dejando a la libre elección de los peces, escoger un camino para su migración aguas abajo no adecuado. Entre los inconvenientes principales de la libre elección de la migración del pez se encuentra en que estos escojan el camino por las tomas de agua, vertederos de exceso o en el caso de

hidroeléctricas los canales que van a las turbinas, dando como resultado una alta mortalidad del pez, como por ejemplo los daños producidos al pasar por un vertedero de exceso que produce desorientación en el pez y por consecuencia ser capturado por especies predatoras, así como también afecciones producidas por la abrasión de la superficie de hormigón del vertedero o choques directos con los disipadores de energía.

4.7.1. SOLUCIONES TÉCNICAS PARA EVITAR EL DESCENSO DEL PEZ POR ESTRUCTURAS NO ADECUADAS EN SU MIGRACIÓN AGUAS ABAJO

Para evitar la mortalidad del pez, provocada por las razones antes mencionadas se sugieren sistemas técnicos de desvío, los cuales evitarían las distintas desorientaciones e induzcan un desplazamiento de los peces en una dirección dada.

Entre estas soluciones técnicas tenemos las siguientes:

- Barreras físicas y comportamentales
- Canales de desviación

4.7.1.1. Barreras físicas

Sirven para evitar el paso de los peces por las tomas de agua, vertederos de exceso y en el caso de hidroeléctricas por las turbinas, su funcionamiento es dado por medio de uso de rejillas con aberturas menores al tamaño de los peces. Son generalmente instaladas en tomas de agua, canales o aliviaderos.

4.7.1.1.1. Tipos de barreras físicas

a) Rejillas temporales

Rejillas instaladas temporalmente en las tomas de agua a generarse debido a la presencia del dique transversal, las cuales deben encontrarse lo suficientemente espaciadas para impedir el paso de los peces, son diseñadas preferentemente para evitar el paso de peces grandes.

b) Pantallas Tipo “Eicher”

Tiene como objetivo principal desviar a los peces hacia un canal de derivación por medio de la ayuda de pantallas inclinadas, tienen como ventajas un buen funcionamiento a velocidades elevadas, además de un bajo costo de mantenimiento.

c) Pantallas hidrodinámicas

Consiste en la instalación de una serie de barras transversales al flujo de agua, generalmente ubicadas con una inclinación de 15 °.

d) Pantallas estáticas

Consiste en tener una superficie con una pendiente inclinada conformada por los siguientes componentes:

- Lámina Inicial de aceleración
- Tramo de alambres horizontales, donde el agua fluye a través de ellos, vuelta que los sólidos y peces fluyen a través de la pantalla hasta llegar al canal de derivación.

4.7.1.2.Barreras comportamentales

Son alternativas atractivas para la protección de los peces, debido a su bajo costo económico, son útiles para peces pequeños y frágiles.

Se tratará de inducir a los peces desplazamientos, por medio de estímulos ejercidos sobre su comportamiento como atracción, repulsión, guía, etc., resultando bastante atractivos para los diferentes constructores, ya que necesitan de poca protección contra la obstrucción y de poco mantenimiento.

Los diferentes estímulos a generarse pueden ser:

- Auditivos
- Visuales
- Hidrodinámicos
- Eléctricos

4.7.1.3. Canales de desviación

Son dispositivos utilizados, para evitar el ingreso de los peces en las tomas de agua generadas por los diques transversales, donde se necesita disponer de varias desviaciones alternativas, para permitir que los peces rodeen el dique transversal, recobrando sin daño alguno su hábitat de origen.

La atracción al pez, puede ser aumentada por medio de la luz, debido a que gran parte de la migración de los peces se realiza nocturnamente.

Por medio de estos conductos o canales se evita todo tipo de choques, rugosidades y ángulos bruscos generados aguas abajo, por lo que la entrada debe localizarse lo más cercano a la zona de desviación.

La obstrucción debida a la presencia de cuerpos flotantes, es uno de los principales problemas para su correcto funcionamiento.

4.7.2. ANÁLISIS PARA EL DESCENSO DEL PEZ EN LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS DE PASO

No existe un tipo de dispositivo de paso eficaz que asegure al 100% el ascenso y descenso del pez, como también que pueda ser utilizado como un dispositivo de doble función, sin embargo cabe indicar las siguientes sugerencias orientadoras basadas en el tipo de diseño de cada dispositivo de paso, los cuales son nombrados a continuación:

- En los ascensores para peces y esclusas, debido al funcionamiento de este tipo de dispositivos, permiten que en las cámaras aguas arriba se puedan atraer y acumular a peces, por consiguiente continuar con su migración aguas abajo sin problemas, debido a su funcionamiento por períodos en ciclos controlados por un sistema de operación, se sugiere la utilización de barreras físicas o comportamentales, para evitar la migración por vertederos de exceso o tomas de agua y a su vez atraer al pez al dispositivo, para que continúe con su migración aguas abajo.

- En ríos artificiales, debido a que simula el curso natural de un río, además de utilizar bajas pendientes y a su vez usar disipadores de energía, inducidos de forma natural por la disposición de ubicación de piedras de manera aleatoria, se da un libre descenso del pez sin inconvenientes, sin embargo se sugiere utilizar la barrera física para evitar el problema del descenso del pez por las estructuras de descarga de excesos ubicados en el dique transversal.
- Rampa para peces, el diseño de este dispositivo de paso permite un descenso adecuado del pez, debido a su baja pendiente y a los disipadores de energía incluidos en la rampa que sirven para romper velocidades excesivas y como sistemas de protección y descanso, este tipo de dispositivos utilizan grandes dimensiones, por donde el pez puede transitar libremente sin interrupción en su migración, se recomienda utilizar barreras comportamentales para evitar el problema del descenso del pez por el dique transversal.
- En los dispositivos como ralentizadores, depósitos sucesivos o escalas de artesas y escotaduras verticales, el problema del descenso del pez se agrava debido a que estos dispositivos son diseñados con estructuras internas como disipadores de energía direccionados y adecuados solo para el ascenso del pez que podrían producir graves daños en los mismos debido a los choques contra estas estructuras, la posible solución para el descenso del pez podría ser el de diseñar un bypass naturalizado (canal de desviación), ubicado y diseñado de acuerdo a las bases y criterios utilizados para ríos artificiales o utilizar un canal de hormigón con fondo naturalizado tipo rampa, si es que el criterio requiere otro tipo de dispositivo para el descenso, cabe señalar que ciertos dispositivos de estos tipos permite el ascenso del pez pero se tendría problemas con el tránsito y la dirección correcta que debería seguir en el dispositivo e incluso a la salida del mismo.

4.8. SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL MEDIO FLUVIAL EN EL ECUADOR

4.8.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN EL PAÍS

La conformación de las cuencas hidrográficas en el Ecuador está determinada y delimitada por la cordillera de los Andes, atravesando de norte a sur el Ecuador.

Existen dos vertientes hídricas que surgen en la cordillera de los Andes en dirección al Océano Pacífico divididas en 72 cuencas y 7 cuencas en la Región Oriental

El territorio nacional del Ecuador se subdivide en 31 sistemas hidrográficos conformados por 79 cuencas en un área total de 256.370 Km², distribuidos de la siguiente manera:

TABLA 4.6. DIVISIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN EL PAÍS

VERTIENTE DEL AMAZONAS	7 Cuencas Hidrográficas	131.802 km ²	51,41 %
VERTIENTE DEL PACÍFICO	72 Cuencas Hidrográficas	123.243 km ²	48,07 %
REGIÓN INSULAR	No considerado	1.325 km ²	0,52 %
TOTAL	79 Cuencas Hidrográficas	256.370 km ²	100 %

Fuente: Ministerio del Ambiente (Ecuador), Ing. Víctor Granda, 2008

Elaborado por: Danny Rojas Vásquez y Daniel Tarambis

Los sistemas hidrográficos presentes en el Ecuador y su subdivisión de cuencas y subcuencas como también sus principales características hidrográficas, se detallan en el Anexo N°3.

4.8.2. SITUACIÓN DE LAS PRINCIPALES CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN EL ECUADOR.

El Ecuador que apenas ocupa un 2 % de la Cuenca Amazónica, se caracteriza por tener tres regiones: la región litoral situada al Oeste de los Andes y caracterizándose por tener elevaciones de hasta 1000 m; la región andina situada

en la parte central del país y caracterizándose por tener elevaciones sobre los 1000 m, la Región Oriental situada al Este de los Andes y caracterizándose por tener generalmente elevaciones variadas, bajo y sobre los 1000 m y las Islas Galápagos situadas en el Océano Pacífico, a 1000 km del Oeste del Continente Americano.

4.8.2.1. Principales cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico

Las principales cuencas hidrográficas de esta vertiente, que de una u otra manera surgen de la cordillera Occidental de los Andes, están formadas por los ríos:

- Chota: Nace en el monte Olivo, entre Imbabura y Carchi y desemboca en el Pacífico colombiano con el nombre de Mira.
- Esmeraldas: Baña la provincia del mismo nombre, está formado por la unión de los ríos Canande, Guayllabamba (recorre parte de la provincia de Pichincha) y Quinindé (formado por la unión de ríos manabitas y pichinchanos).
- Guayas: Desemboca en el golfo de Guayaquil y recibe las aguas del Daule y Babahoyo. El Daule, con sus afluentes, baña las provincias de Manabí, Los Ríos y Guayas. El Babahoyo, formado especialmente por el río Yaguachi y este por la unión de los ríos chimboracenses Chimbo y Chanchán, recorre las provincias de Chimborazo, Los Ríos y Guayas. La cuenca del Guayas es la más importante de todas, posee una superficie de 40.000 km².
- Cañar: Se origina en la laguna de Culebrillas con el nombre de San Antonio y desemboca en el golfo de Guayaquil. Recorre las provincias de Cañar y Guayas.
- Jubones: Está formado por las aguas de los ríos León, Girón, Rircay y San Francisco, que nacen en las estribaciones del nudo de Portete-Tinajillas. Recorre las provincias de Azuay y El Oro, y desemboca en el Pacífico.
- Macará: Nace con el nombre de Espíndola, en el nudo de Sabanilla. En su recorrido por Loja toma el nombre de Calvas y finalmente de Macará. Se une al Catamayo y llega al Pacífico peruano con el nombre de río Chira.

4.8.2.2. Principales cuencas hidrográficas de la vertiente del Amazonas

Esta vertiente está formada por la afluencia de numerosos ríos ecuatorianos que nacen en la cordillera Oriental de los Andes y en la cordillera Amazónica ecuatoriana. Principalmente se caracterizan por ser caudalosos y navegables en casi todo su curso. Se destacan en dicha vertiente los ríos:

- Putumayo: En su mayor parte pertenece al territorio colombiano, pero recibe las aguas del río ecuatoriano San Miguel. Desemboca en el Amazonas.
- Napo: Se forma por la unión de algunos ríos procedentes principalmente de las provincias de Tungurahua y Cotopaxi, en su recorrido recibe las aguas del Coca, Aguarico y Curaray; al unirse con el Marañón forma el Amazonas.
- Tigre: Surge de la confluencia de los ríos Conambo y Pituyacu, en la provincia de Pastaza. Desemboca en el río Marañón.
- Pastaza: Nace en la provincia de Tungurahua con el nombre de río Cutuchi y Patate, recibe las aguas del Palora y Guasago. Desagua en el Marañón.
- Santiago: Resulta de la unión de los ríos Namangoza y Zamora. El primero recibe las aguas del Paute y Upano. El segundo se forma en la provincia de Loja y recibe a los ríos Nangarlta y Yacuambl. Deposita sus aguas en el Marañón.

4.8.2.3. Principales cuencas lacustres

A lo largo de la sierra ecuatoriana y en parte de la región amazónica, se localizan algunos 'asentamientos' lacustres que tienen características y atractivos especiales: son la fuente de formación de muchos ríos y han servido para la construcción de algunos proyectos, especialmente deportivos o turísticos, como es el caso del autódromo construido a orillas de Yaguarcocha o el incremento de la pesca en las diferentes lagunas de la patria.

Estas cuencas lacustres están compuestas por algunos lagos y por muchas lagunas de diversa forma y tamaño. Los lagos son más grandes y profundos que las lagunas.

En nuestra Amazonía se encuentran también algunos lagos de importancia, como el Limoncocha, Taracoa, Zancudococha, Jatuncococha, Cuyabeno y Lago Agrio.

En las demás provincias serranas se destacan complejos naturales de lagunas y lagunillas. Únicamente se consideran a las más importantes en:

- Pichincha: Muertepungu, Dormida y Secas.- Cotopaxi: Yambo y Quilotoa. Chimborazo: Coito y Osogoche o Cubillín.
- Cañar: Culebrillas y Aucacocha
- Azuay: Osohuayco, Luspa, Angas, Toreadora y más de 150 lagunas situadas en la cordillera del Cajas y Chanchán.

4.8.3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FLUVIAL Y ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN EL ECUADOR

4.8.3.1. Sistemas fluviales y los ecosistemas acuáticos

Los ríos y ecosistemas acuáticos en el Ecuador disponen de una rica red hidrográfica, salvo en las zonas occidentales y meridionales áridas de la Costa, administrativamente casi todos los ríos se originan en los altos relieves andinos; éstos son cortados por profundas gargantas, y las direcciones de flujo de agua se dirigen unas hacia la llanura amazónica y otras hacia el océano Pacífico. Los ríos que se dirigen hacia el Pacífico por lo general son muy navegables.

La región Andina dominante de los sistemas fluviales del Ecuador, se encuentra dominada principalmente por los sistemas fluviales de la región del litoral como: los del río Guayas con muchos ríos caudalosos, la zona de captación del río Esmeraldas y el río Santiago próximo a la frontera con Colombia además de varios ríos pequeños que nacen de las zonas montañosas del litoral que son de vital importancia para la pesca, entre ellos: el río Chone.

Muchos ríos del Oriente ecuatoriano desaguan en el río Amazonas. Los más importantes son el Putumayo, el Napo, el Pastaza, el Santiago y el Marañón. Algunos de estos nacen en la Cordillera Occidental o reciben de la misma

caudales importantes pasando por el Altiplano y atravesando la Cordillera Oriental.

Las grandes crecidas de caudal marcan una característica importante de los ríos ecuatorianos en épocas de lluvia en las zonas montañosas de los Andes. En el Litoral, las máximas crecidas se registran casi siempre en Abril y en el Oriente en Mayo variando un año a otro y desde una semana a un mes. En ríos de la costa los niveles de agua fluctúan de 1 a 6 metros, sobre todo en la cuenca del Guayas en épocas de grandes fluctuaciones, diariamente se registra un incremento de nivel de agua de 1 a 2 metros. Las lluvias aisladas pueden causar crecidas repentinas locales dentro de la estación de las lluvias o fuera de ella. Por esta razón los ríos no aumentan de caudal en forma uniforme, sino que pueden variar en varios metros en un plazo muy corto.

En la región del litoral a los 1000 m, la flora y fauna se hacen tropicales, la producción de peces y el alimento para ellos es escaso en las partes altas, este problema se va aumentando gradualmente. La producción biológica desciende considerablemente. Se han registrado gran porcentaje de mortandad de los peces debido a los factores antes nombrados.

Muchos de los ríos andinos o de montaña labran en los suelos volcánicos profundos valles de erosión de paredes empinadas en algunos tramos de su curso. Con frecuencia salen de las montañas a través de estrechas gargantas o forman cascadas o cataratas. No se han registrado “aguas dormidas” en este sector a las que puedan acogerse los peces.

Las regiones ecológicas en los ríos del Ecuador se asemejan mucho a los de los climas templados de Europa, debido a la introducción de peces autóctonos de dichos países.

Los caudales de los glaciares inician con temperaturas de 0 °C su pH es prácticamente neutro, Los caudales de los manantiales tienen temperaturas de 7 a 15 °C, en los ríos tropicales tiene temperaturas mayores entre 15 y 20 °C. Los

insectos acuáticos que constituyen un buen alimento para la trucha, abundan mucho en los sectores de los manantiales, la fauna acuática de larvas e insectos es menos y menos densa en ríos tropicales.

En la Sierra se encuentran pequeños lagos de montaña. Se detalla tres clases de ellos:

Lagos de cráter, en cráteres volcánicos muertos. Características: redondos, profundos, orillas escarpadas, en su mayoría sin afluentes o emisarios, oligotróficos, aguas muy límpidas y muy poco fitoplancton.

Lagos de páramo, en depresiones de las altas mesetas por encima de los 3.000 m. Sus alrededores están desprovistos de árboles y se caracterizan por la existencia de "hierba de páramo, musgos y líquenes. Su pH entre 6 y 7; poco fitoplancton, pero en muchos casos grandes cantidades de vegetación mayor sumergida. Este último distrito lacustre contiene más de 200 lagos pequeños, la mayoría de los cuales no llegan a 2 ha de superficie.

Otros lagos de montaña, en depresiones naturales, casi siempre por bajo de los 3 000 m, o por lo menos por bajo del límite arbóreo. Características más variables, en su mayoría poco profundos; casi siempre con orillas de aguas someras; casi siempre de aguas cálidas, considerablemente por encima de los 15 °C, e incluso de más de 20 °C; pH en casi todos los casos superior a 7; contiene fitoplancton; vegetación superior sumergida.

En las tierras bajas del Oriente los ríos principales forman numerosos lagos periódicos y poco permanentes, así como remansos de aguas después de las crecidas, estos lagos son poco profundos y muy fértiles, la mayoría de estos lagos están cubiertos por una extensa vegetación, tienen una comunicación directa con el río Napo.

Los embalses creados en las tierras del Oeste del país sostienen un potencial de peces aún mayor que los del Oriente por ejemplo los del embalse de Poza Honda. Se está estudiando la posibilidad de crear más embalses en la provincia de

Manabí con la finalidad de reproducción y aumento de peces en los ríos, así como la creación de embalse para la generación de energía eléctrica, agua potable y riego en las zonas de alta montaña como en Pisayambo, Píllaro, Quijos. Se ha terminado las construcciones en los ríos Pita y Tambo de un pequeño embalse para abastecimiento de agua potable a Quito. Este embalse y el sistema de canales serían adecuados para mantener poblaciones de truchas.

Cuando se produce las crecidas, varios de los ríos andinos llevan grandes cantidades de materiales acarreados, desde grandes cantos rodados y árboles hasta cascajo, arena y limo fino. Los ríos que provienen desde grandes altitudes llegan a las partes bajas de las montañas con grandes velocidades lo que conlleva a que estos acarreen maderos y desechos.

4.8.4. ICTIOFAUNA EN EL ECUADOR

4.8.4.1. Tipo de peces en el Ecuador

En el Ecuador existen por lo menos 850 especies de peces de agua dulce (Albuja, 2002), de las cuales solo se registran 706 especies. La información sobre la situación actual de los peces en el Ecuador es escasa y no se puede estimar con exactitud la cantidad de especies existentes en el Ecuador en los ecosistemas acuáticos ambiente debido a la falta de interés en el estudio de la ictiofauna.

Las publicaciones del Instituto Nacional de Pesca del Ecuador en Guayaquil (1963–1964) registran un listado de peces en las provincias de El Oro, Manabí, Guayas, Los Ríos y Esmeraldas. La publicación referente a Guayas y Los Ríos contiene una lista especial de 19 nombres vulgares de peces de agua dulce de importancia comercial.

Se registraron 276 especies correspondientes a 144 familias de peces de agua dulce en el Ecuador, (W.M. Ovchynnyk de la Universidad del Estado de Michigan, Estados Unidos (1967)).

En el Anexo N°4, se presentará una tabla de los peces ecuatorianos de importancia económica y más frecuente en los ríos del Ecuador.

4.8.4.2.Migración y Desove de los peces en el Ecuador

El material disponible no es suficiente para determinar los límites de la distribución por especies. Se ha observado en Santo Domingo de los Colorados, a 500 m de altitud, migraciones de peces a lugares de desove aguas arriba, en donde normalmente no se encuentran peces adultos. La mayoría de los peces maduros sexualmente desovan en el propio lecho del río (FAO, Dr. Arno Meshkat, 1975). Pero de las observaciones sobre la composición por especies se deduce que el desove principal se produce en las llanuras inundadas, cuando el río se desborda, lo que ocurre normalmente en marzo y dura hasta mayo o junio

Cuando los ríos desbordan sus orillas, los peces se esparcen por las llanuras inundadas para desovar y alimentarse. Las llanuras inundadas es el lugar donde emigran la mayoría de los peces comerciales para desovar, y que en toda la Sierra existen zonas de desove inaccesibles.

CAPÍTULO 5

BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS DE PASO EN DIQUES TRANSVERSALES PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

5.1. INTRODUCCIÓN

Para este capítulo se propondrá una metodología, en la cual se tratará de unificar las diferentes bases y restricciones descritas en el capítulo 3 y analizadas en el capítulo 4 de una manera totalmente objetiva, donde la percepción y la subjetividad sean encaminadas a una mínima expresión, abarcando todos los aspectos estudiados y analizados anteriormente.

5.2. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA PLANTEAR LAS BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

En base a lo estudiado y analizado anteriormente sobre la teoría existente, hay tres principios básicos que rigen un correcto funcionamiento de un dispositivo de paso de tránsito del caudal ecológico, estos son: el caudal circulante, capacidades biológicas del pez y el dispositivo de paso. El dispositivo debe tener en cuenta los dos primeros requerimientos (caudal ecológico y capacidades biológicas del pez).

A continuación se expone en forma resumida los puntos que abarcan la metodología propuesta, para plantear las bases y criterios del dimensionamiento de un dispositivo de tránsito de caudal ecológico, los cuales son los siguientes:

- 1) Valoración del obstáculo
- 2) Determinación y estimación de las capacidades de nado de la especie objetivo o insignia.
- 3) Determinación de las características físicas e hídricas actuantes en el río
- 4) Criterios a tomar en cuenta para la correcta ubicación del dispositivo

- 5) Elección del tipo de paso
- 6) Bases y criterios generales para el diseño del dispositivo escogido

5.2.1. VALORACIÓN DEL OBSTÁCULO

La valoración del obstáculo, se basará en la situación a presentarse en los escenarios visibles en el río, aguas arriba, aguas abajo y en el obstáculo a ser franqueado. A continuación se citaran las diferentes escenarios ocasionados por el obstáculo.

- Niveles de caudal presentes aguas arriba y aguas abajo en el obstáculo, con el objetivo de determinar la diferencia de niveles a ser franqueada por el dispositivo de paso

$$H_f = N_{aguas\ arriba} - N_{aguas\ abajo} \quad (5.1)$$

Donde:

H_f : Altura a ser franqueada por el pez

N : Nivel de caudal presente en el sitio del obstáculo.

- Determinación y localización de las diferentes estructuras presentes en el obstáculo como tomas de agua, vertederos o canales de excedencia, donde se valorará la situación más crítica que presenten mayores velocidades y rangos de turbulencia en el flujo de agua, para la posterior ubicación del dispositivo, entre estas valoraciones tenemos:
 - La distancia en la que se tendría un flujo estable, esta valoración se da debido a la turbulencia generada por las estructuras presentes en el obstáculo, para la implementación de la entrada, salida y el dispositivo en sí mismo.
 - La distancia a ubicarse la entrada del dispositivo, cuando se descargue los caudales excedentes en el obstáculo, debido a la turbulencia que este generaría aguas abajo en el pie del obstáculo.
 - La diferencia entre las variaciones de nivel, entre caudales de crecidas y caudales medios en la entrada del dispositivo, que no deben superar los rangos de 0.50 a 1.00 m de calado.
- Determinación de la longitud horizontal desde el pie del obstáculo hasta la ubicación ideal de la poza de entrada al dispositivo, para el posterior cálculo de la pendiente del dispositivo.

$$I = \frac{H_f}{L_h} \quad (5.2)$$

Donde:

I : Pendiente del dispositivo

L_h : Longitud horizontal desde el pie del obstáculo hasta la poza de entrada al dispositivo.

5.2.2. ELECCIÓN Y ESTIMACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE NADO DE LA ESPECIE OBJETIVO O INSIGNIA PARA EL DISEÑO DEL DISPOSITIVO

5.2.2.1. Parámetros de elección de la especie objetivo o insignia

Se determinará la especie objetivo o insignia, como una base para el dimensionamiento del dispositivo, en base a un estudio económico, social y medio ambiental.

Entre estos parámetros tenemos los siguientes:

- Migración y desove de las especies
- Fines comerciales de las especies acuáticas
- Peligro de extinción

Como una ayuda se utilizará la tabla mostrada en el Anexo N°4, para una mejor comprensión de la situación de los diferentes peces en el Ecuador.

5.2.2.2. Estimación de las capacidades de nado de la especie objetivo o insignia

En esta sección se expondrá las ecuaciones utilizadas para cuantificar los mecanismos motrices de los peces, que son los que tienen que producir el movimiento necesario para superar el obstáculo a franquear, según la teoría expuesta de los diferentes autores, para lo cual se requiere de una medición de estas capacidades.

En la tabla 5.1, se presentarán las diferentes variables a ser tomadas en cuenta para la cuantificación de las capacidades motrices de los peces, para un posterior diseño y elección del dispositivo.

El fin de la tabla 5.1., es determinar las variables necesarias para estimar cuantitativamente las capacidades de los peces y así lograr nuestro objetivo de utilizar estos datos calculados para el correcto dimensionamiento del dispositivo de paso.

Para el caso de especies acuáticas en el Ecuador se adjunta en el Anexo N^º4, los tamaños máximos de los peces localizados en las distintas regiones del Ecuador.

TABLA 5.1. VARIABLES NECESARIAS PARA ESTIMAR CUANTITATIVAMENTE LAS CAPACIDADES DE LOS PECES

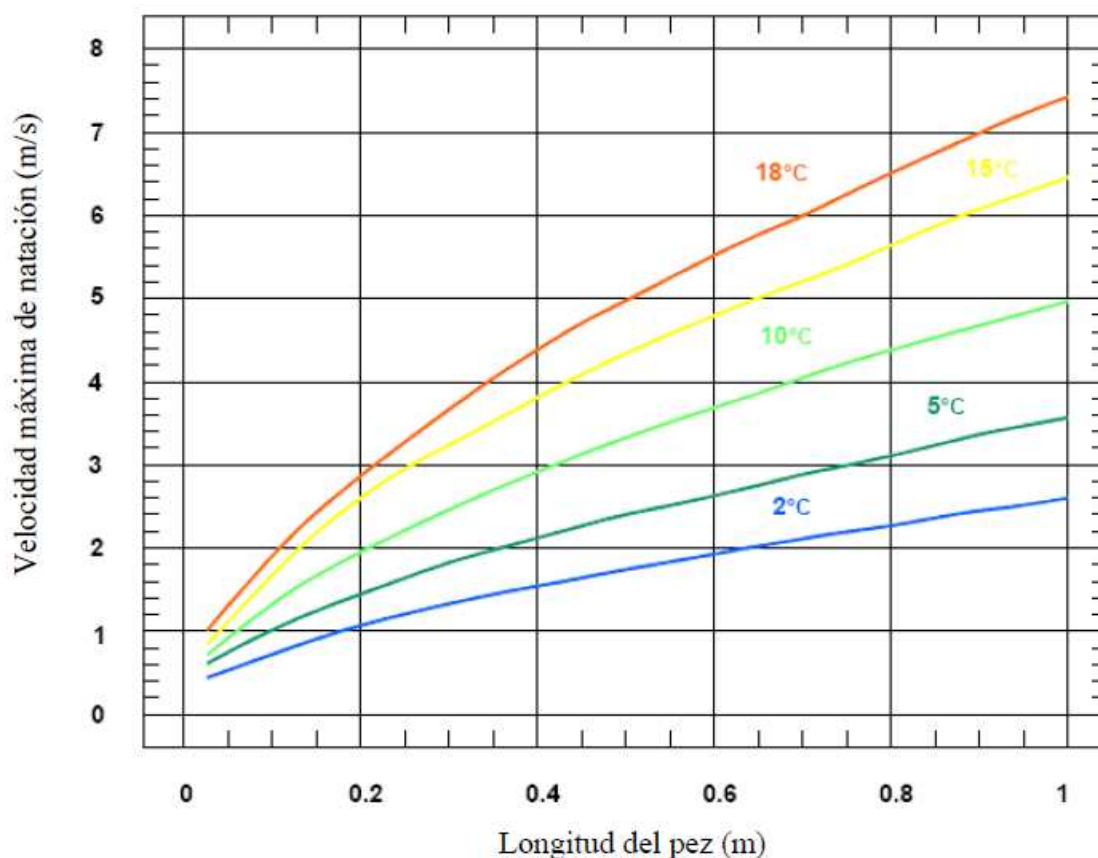
ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL PEZ	VARIABLE PRINCIPAL A SER CONSIDERADA	EXPRESIÓN UTILIZADA PARA SU ESTIMACIÓN	VARIABLES UTILIZADAS EN EL CÁLCULO DE LA EXPRESIÓN
Resistencia	Tiempo de permanencia	$t_p = \frac{E}{P_r - P_s} \quad (4.4)$ $t_p = \frac{1970 \times 10.836 \times L^{2.964}}{(0.9751 \times e^{-0.0052t} \times V^{2.8} \times Lc^{-1.18}) - (4.44 \times 10.836 \times Lc^{2.964})} \quad (4.5)$	E: Energía total almacenada P _r : Potencia requerida para nadar a una determinada velocidad P _s : Potencia Suministrada por la musculatura del pez Lc: Tamaño del pez T: Temperatura del agua en °C V: Velocidad máxima del pez
Distancia recorrida	Velocidad de nado del pez	$d_r = (V_n - V_d) \times t_p \quad (4.6)$	V _n : Velocidad de nado V _d : Velocidad del agua en el dispositivo t _p : Tiempo de permanencia
Velocidad del pez a través del medio acuático	Tamaño del pez	$V_n = \frac{0.7 L.C.}{2t} \quad (4.3) \quad V_{m\acute{a}xima} : \frac{10 L.C.}{t} \quad V_{cruce} : \frac{2 L.C.}{t}$	t: Tiempo mínimo entre dos contracciones musculares L.C. : Tamaño del pez
Capacidad de Salto	Ángulo de salida del pez	$Y_{m\acute{a}x} = \frac{V_o^2 \text{Sen}^2 \theta}{2g} \quad (4.8) \quad X_{m\acute{a}x} = \frac{V_o^2 \text{Sen}^2 \theta}{g} \quad (4.9)$ <p style="text-align: right;"><i>Solo Para $\theta = 45^\circ$</i></p>	Y _{máx} : Altura máxima vertical del pez X _{máx} : Alcance máxima horizontal del pez V _o : Velocidad con la que sale el pez del agua g: Gravedad de la tierra q: Angulo de Salida del pez al agua

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

Para una forma sencilla de estimar las velocidades, tiempo de permanencia y distancia recorrida, se proyecta a continuación 3 ábacos estudiados en forma experimental por parte de los autores Zhou y Larinier.

- **Abaco (1).** Este ábaco relaciona las velocidades máximas de natación con la talla de los peces y la temperatura. El objetivo principal es determinar la velocidad máxima teniendo como dato la temperatura del flujo y la longitud del pez.

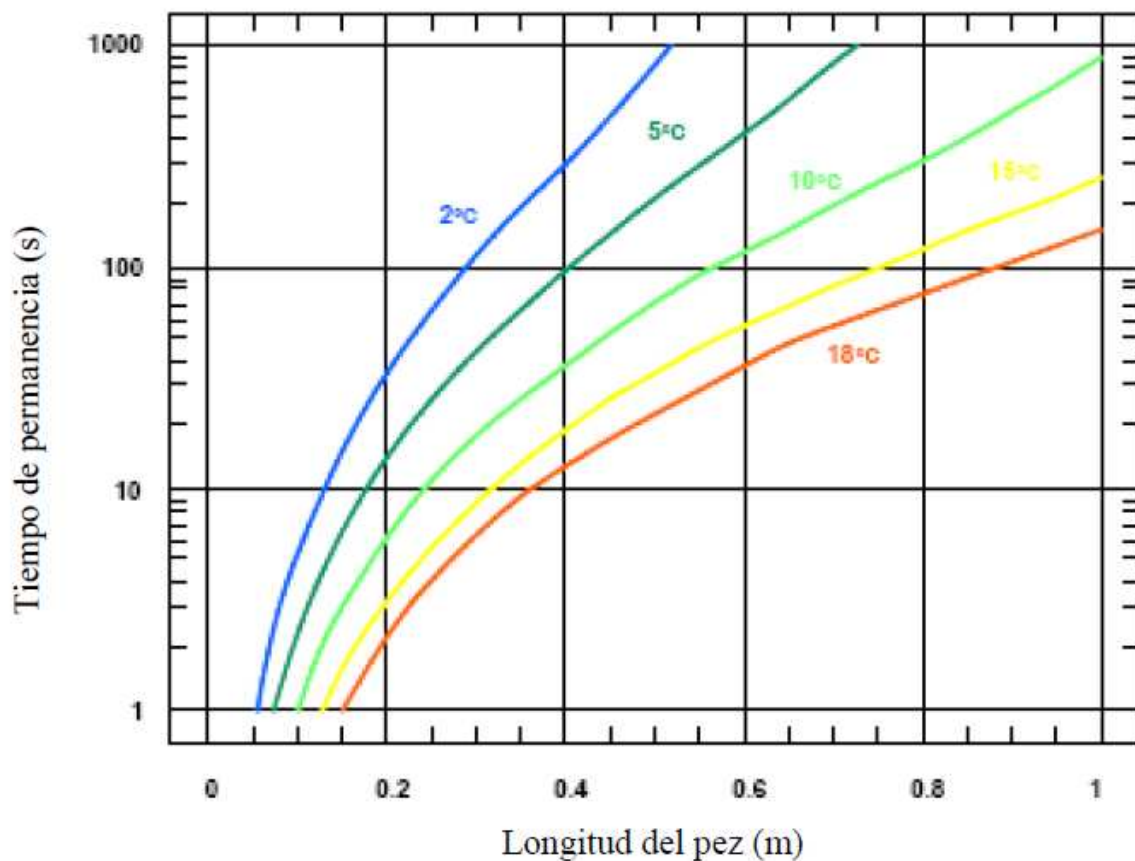
FIGURA 5.1. VELOCIDAD MÁXIMA VS LONGITUD DEL PEZ



Fuente: Universidad Politécnica De Madrid, Estudio para la mejora hidráulica y adecuación ambiental de los aprovechamientos del río Era a su paso por el T.M. de Torneros de la Valderia (León), Antonio Morán Gonzales, Julio 2009.

- **Abaco (2).** Las especies acuáticas poseen un tiempo de permanencia en la que pueden mantener la velocidad de nado, el ábaco a continuación indica el tiempo de permanencia que puede retener relacionándola con la temperatura del agua y el tamaño del pez.

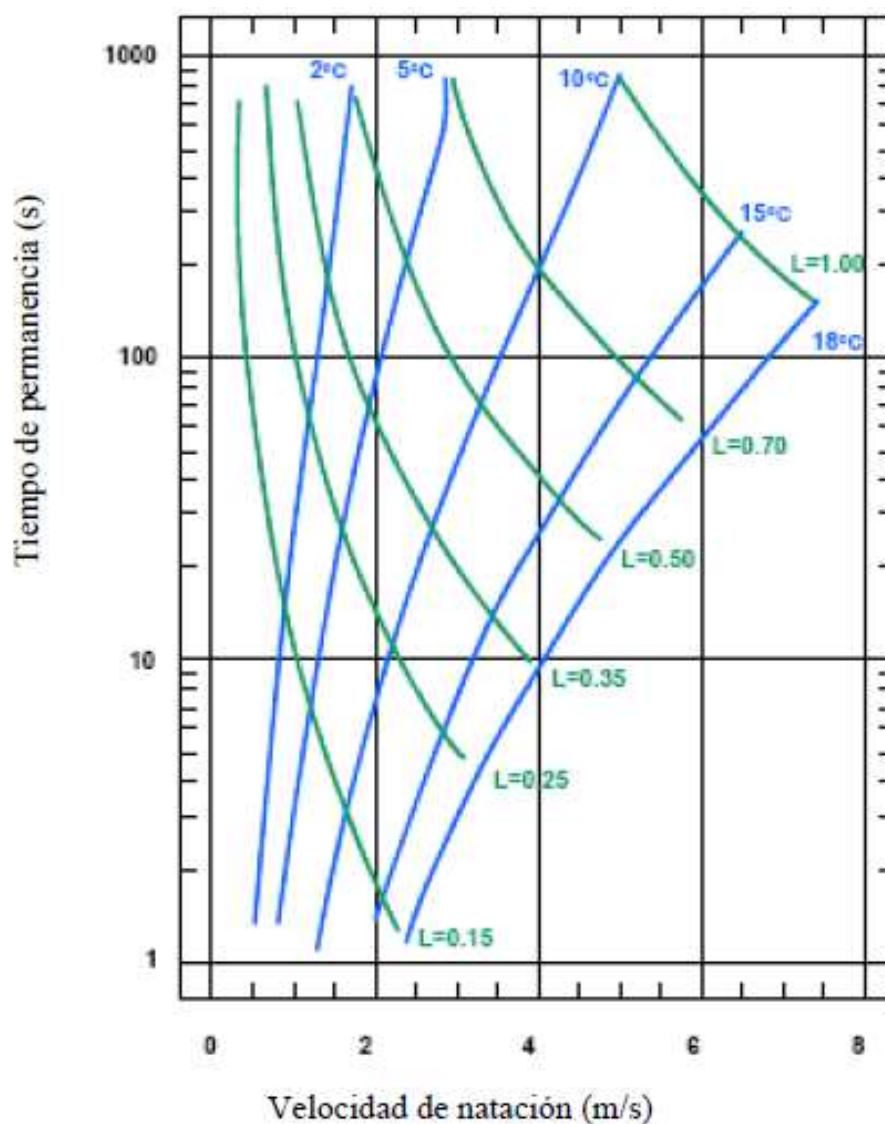
FIGURA 5.2. TIEMPO DE PERMANENCIA VS LONGITUD DEL PEZ



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, Estudio para la mejora hidráulica y adecuación ambiental de los aprovechamientos del río Eria a su paso por el T.M. de Torneros de la Valderia (León), Antonio Morán Gonzales, Julio 2009.

- **Abaco (3).** Una vez obtenido el tiempo de permanencia del pez según el ábaco anterior se podrá también obtener el mismo resultado a manera de comprobación con el siguiente ábaco propuesto por Zhou, que aparte de encontrar este tiempo, puede determinar la velocidad de nado, relacionando los factores de longitud o tamaño del pez y la temperatura del río.

FIGURA 5.3. TIEMPO DE PERMANENCIA VS VELOCIDAD DE NADO



Fuente: Universidad Politécnica De Madrid, Estudio para la mejora hidráulica y adecuación ambiental de los aprovechamientos del río Eria a su paso por el T.M. de Torneros de la Valderia (León), Antonio Morán Gonzales, Julio 2009.

La distancia recorrida se determinará con la ecuación antes expuesta.

TABLA 5.2. RELACIÓN DE LOS DIFERENTES ÁBACOS CON LAS CAPACIDADES DE NADO DE LOS PECES, PARA UN CORRECTO DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO DE PASO.

VARIABLES		ABACO	RELACIÓN CON EL DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO
Velocidad máxima	(Vm)	1	La velocidad máxima del pez, ayudará resolver el problema de la capacidad que tiene el pez para romper velocidades del flujo en el dispositivo de paso producida por el tabique o hendiduras verticales así como las velocidades en los saltos.
Tiempo de permanencia	(tp)	2	Parámetro necesario para calcular la distancia recorrida.
Velocidad de nado	(Vn)	3	Parámetro necesario para calcular la distancia recorrida.
Distancia recorrida	(dr)	$dr = (Vn - Vd) \cdot tp$ (4.6)	Con este dato se podrá estimar la longitud del dispositivo o la ubicación de estructuras de descanso en los dispositivos de paso para el pez en función de la distancia recorrida del pez antes de llegar a la fatiga de la especie acuática.

Elaborado por Daniel Tarambis y Danny Rojas.

Como no es objetivo de esta tesis el realizar un análisis experimental para poder elaborar las gráficas antes indicadas con las especies presentes en nuestros ríos, es preciso remarcar que uno de los parámetros de entrada necesarios para el dimensionamiento de los dispositivos de tránsito de caudal ecológico son estas gráficas de los ábacos mostrados anteriormente.

5.2.3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIDROLÓGICAS ACTUANTES.

En este subcapítulo se determinará en forma cualitativa las características físicas e hidrológicas presentes en la sección del obstáculo tanto aguas arriba como aguas abajo, con el fin de establecer criterios que nos ayuden a determinar la correcta ubicación del dispositivo de paso.

La tabla 5.3., que se mostrará a continuación presenta los puntos importantes a ser estudiados en la cuenca del río así como una sugerencia de qué metodología puede emplearse para resolver estos parámetros.

.

TABLA 5.3. PARÁMETROS A ESTUDIAR EN EL RÍO, PARA DETERMINAR LAS BASES DE DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO

PARÁMETROS DE ESTUDIO	Objetivos a estudiar	Puntos a determinar	Metodología para cálculo (recomendado)	Criterios y Observaciones para la implantación del dispositivo
Estudio hidrológico	Caudales máximos	Variación de niveles presentes en la sección del obstáculo.	Recolección de datos en el INAMHI, se basara en la estación más cercana de la cuenca a determinar, para posteriormente utilizar los datos y calcular la metodología propuesta por la hidrología.	Se determinara la variación de caudal, si la variación es mayor a 0.50cm, el diseño del dispositivo contemplara una salida de ranura vertical planteada anteriormente (cap. 3). Procurar que el calado mínimos este de acuerdo a la ecuación 0,25m mas tamaño del pez, para el río aguas abajo contemplando el diseño de un canal triangular para obtener una continuidad desde la poza hasta la ubicación del río aguas abajo.
	Caudales mínimos	Máximas crecidas que podrían presentarse en el río.		
	Periodos de retorno	Épocas de estiaje y calados mínimos.	Mediciones por sistemas automatizados de aforo en el sitio del proyecto. Se sugiere como una forma de ayuda al lector revisar el anexo N°3	
	Precipitación			
Estudio del Cálculo de caudal ecológico	Caudal ecológico	Posible Caudal mínimo, para la continuidad de los ecosistemas aguas abajo del obstáculo.	Método Hidrológico Método Hidráulico Método de simulación de habitat Metodología Holistica (Capitulo 2)	Esta es una base de diseño primordial para el dimensionamiento del dispositivo, ya que este regirá la continuidad de los ecosistemas aguas abajo como también la velocidad, calado, el caudal a circular por el dispositivo, y el dimensionamiento geométrico del dispositivo.
	Características Físicas y Químicas del río	Pendiente	Regímenes de flujo Cambios de pendiente a la cercanía del obstáculo.	Ecuación 4.1
Velocidad del flujo		Turbulencias a presentarse en el obstáculo.	Determinación mediante la metodología descrita en libros de hidráulica fluvial	Si la velocidad de flujo de la cabecera es mayor que 0,50m/s, el área de salida del dispositivo de paso tiene que ser prolongado en la cabecera por una pared de partición de longitud mínima 5m. Hay que evitar tener velocidades de flujo mayores a 2m/s en la ubicación posterior al área de la cabecera del dispositivo.
Profundidad del río		Niveles del fondo del río aguas arriba y aguas abajo.	Batimetría en el río para obtener el perfil transversal	Evitar en épocas de estiaje el problema de continuidad del río aguas abajo del obstáculo por el calado insuficiente que se presente, dando como solución la inyección de caudales alternos o la creación de un canal triangular que conecte la poza con la continuidad del río aguas abajo cumpliendo con la ecuación de calado mínimo.
Temperatura		Variabilidad de la temperatura en el río.	Observar tabla de anexos N°3 (ríos en Ecuador). Recolección de datos en el INAMHI.	Necesario para determinar las capacidades de nado del pez
Oxigeno		Oxigeno disuelto	Estudio Químico del agua	Tiene que ser Menores a 9 mg/l ya que está estrechamente relacionado con las capacidades de resistencia de nado del pez.
Estudio de los efectos físicos en el río	Sedimentación	Nivel de sedimentos en el río.	Ecuación 4.3 Figura 4.2	Ayudará a determinar la posible acumulación de sedimentos en la entrada del flujo del dispositivo y en el dispositivo en sí.
	Erosión	Socavaciones a presentarse en el lecho del río	Tabla 4.1 Figura 4.2	Nivel de socavación posible en las proximidades de la implantación del dispositivo, ayudándonos a determinar su correcta ubicación tanto de la entrada como en la salida del mismo.

Elaborado por: Daniel Tarambis y Danny Rojas

5.2.4. CRITERIOS A TOMAR EN CUENTA PARA LA CORRECTA UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO

Los parámetros para determinar los criterios a tomar en cuenta para un correcto diseño y ubicación del mismo son: la entrada, salida y el dispositivo propiamente dicho. A continuación se citarán algunos criterios a tomar en cuenta en los parámetros nombrados anteriormente.

- La entrada deberá ubicarse lo más próximo al pie del obstáculo después de las turbulencias producidas por las estructuras de descarga de flujo evitando así la turbulencia generada por estas mismas.
- Se debe ubicar la salida del paso perpendicularmente a la dirección del flujo de agua, para evitar la formación de zonas de recirculación y evitar con esto que materiales flotantes en el río como ramas, troncos, maleza, no entren en el dispositivo.
- La salida del dispositivo debe encontrarse alejada de las tomas de las turbinas para hidroeléctricas y de los canales de derivación, como tomas de agua y vertederos de descarga, para evitar el arrastre ocasionado por el caudal que entra en estas estructuras (distancia de separación mínima 5m); (Fish passes, design dimensions and monitoring, Rome, 2002).
- La entrada y salida deberá tener una vinculación con el fondo y el sustrato del río, por lo que su ubicación preferentemente se dará cercanas a las orillas del río, evitando las márgenes que tengan problemas de socavación y aquellas que sufran de sedimentación excesiva.
- La localización del dispositivo debe encontrarse perpendicular al obstáculo y apegado a las orillas del río, orientado paralelamente a la dirección de flujo de agua.

Para la posible ubicación del dispositivo, observar figura 3.5

5.2.5. ELECCIÓN DEL TIPO DE DISPOSITIVO DE PASO

En base a la teoría analizada y al estudio de los dispositivos de paso así como también de los obstáculos, se despliega a continuación una tabla, en el cual se

analizó de forma crítica, cual serían las bases y criterios para la elección de un tipo de dispositivo de paso de caudal ecológico. De una manera crítica se ha determinado como base importante la altura del obstáculo (diferencia de nivel entre nivel aguas arriba y nivel aguas abajo) relacionándola con el dispositivo a ser utilizado en el cual se despliega las ventajas, desventajas, funcionamiento y criterios de diseño más relevantes de los dispositivos a manera de que la elección pueda ser fácil y con un criterio en base a las condiciones que se presenten en los diferentes proyectos. Hay que tomar en cuenta de que la tabla forma parte de una ayuda en la elección del dispositivo ya que existen otras bases que tiene que cuantificarse nombrados anteriormente en este capítulo, se recomienda revisar los capítulos para tener una elección más acertada.

TABLA 5.4. ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE PASO

ALTURA DEL OBSTÁCULO	DISPOSITIVOS DE PASO	ABR	TIPOS DE DISPOSITIVOS	CARACTERÍSTICAS TIPO DE DISPOSITIVO	BASES DISPOSITIVO
Mayores a 8 metros	Esclusa	A	Esclusa Vertical Esclusa Inclínada	3.8.1.3.1 3.8.1.3.2	3.8.1.4
	Ascensor	B	Ascensor con dispositivos de captura integrado en la cuba Ascensor con concentración de peces mecanizada	3.8.2.4.1 3.8.2.4.2	3.8.2.7
Entre 8 y 5 metros	Escala de Artesas o Depósitos Sucesivos	C	Paso de Tabiques	3.8.4.1.1	3.8.4.4
			Paso de Tabiques con Escotaduras Libres	3.8.4.1.1	
			Paso de Tabiques con Escotadura Sumergida	3.8.4.1.2	
			Paso de Tabiques con Orificio Sumergido	3.8.4.1.2	
			Paso de Tabiques con Escotadura Semisumergida y Orificio Sumergido	3.8.4.1.2	
	Paso de Escotaduras Verticales	D	Con dos Escotaduras Verticales Con Deflectores Laterales Sin Deflectores	3.8.7.2.1 3.8.7.2.2 3.8.7.2.3	3.8.7.4
Entre 5 y 2.5 metros	Ralentizadores	E	Ralentizadores Planos	3.8.6.2.1	3.8.6.5
			Ralentizadores de Fondo	3.8.6.2.2	
			Ralentizadores mixtos o tipo Alaska	3.8.6.2.3	
	Escala de Artesas o Depósitos Sucesivos	C	Paso de Tabiques	3.8.4.1.1	3.8.4.4
			Paso de Tabiques con Escotaduras Libres	3.8.4.1.1	
			Paso de Tabiques con Escotadura Sumergida	3.8.4.1.2	
			Paso de Tabiques con Orificio Sumergido	3.8.4.1.2	
			Paso de Tabiques con Escotadura Semisumergida y Orificio Sumergido	3.8.4.1.2	
	Paso de Escotaduras Verticales	D	Con dos Escotaduras Verticales	3.8.7.2.1	3.8.7.4
			Con Deflectores Laterales	3.8.7.2.2	
			Sin Deflectores	3.8.7.2.3	
Entre 2.5 y 1 metro	Escala de Artesas o Depósitos Sucesivos	C	Paso de Tabiques	3.8.4.1.1	3.8.4.4
			Paso de Tabiques con Escotaduras Libres	3.8.4.1.1	
			Paso de Tabiques con Escotadura Sumergida	3.8.4.1.2	
			Paso de Tabiques con Orificio Sumergido	3.8.4.1.2	
			Paso de Tabiques con Escotadura Semisumergida y Orificio Sumergido	3.8.4.1.2	
	Rampas de piedra	F	Rampa para peces de máxima anchura	3.8.5.1.1	3.8.5.3
			Rampa para peces de anchura parcial	3.8.5.1.2	
	Rampas de hormigón	G	Rampa en hormigón armado con fondo naturalizado	3.8.5.3.2	3.8.5.3.2
	Ríos Artificiales	H	Ríos Artificiales	3.8.3	3.8.3.4
	Paso de Escotaduras Verticales	D	Con dos Escotaduras Verticales	3.8.7.2.1	3.8.7.4
			Con Deflectores Laterales	3.8.7.2.2	
			Sin Deflectores	3.8.7.2.3	
	Ralentizadores	E	Ralentizadores Planos	3.8.6.2.1	3.8.6.5
			Ralentizadores de Fondo	3.8.6.2.2	
			Ralentizadores mixtos o tipo Alaska	3.8.6.2.3	
Menores a 1 metro	Ríos Artificiales	H	Ríos Artificiales	3.8.3	3.8.3.4
	Rampas de piedra	F	Rampa para peces de máxima anchura	3.8.5.1.1	3.8.5.3
			Rampa para peces de anchura parcial	3.8.5.1.2	
	Rampas de Hormigón	G	Rampa en hormigón armado con fondo naturalizado	3.8.5.3.2	3.8.5.3.2

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL DISPOSITIVO	
A	<p>Válida para especies pequeñas</p> <p>Velocidades en la entrada y salida con niveles aceptables para el pez</p> <p>Tipo de funcionamiento discontinuo, no permite el paso continuo del caudal ecológico</p> <p>Requiere de sistemas de control</p> <p>Limitada capacidad de peces en la cámara</p> <p>Requiere de un control mecanizado sincronizado</p>
B	<p>Requiere de dispositivos mecánicos</p> <p>Requiere de sistemas de control</p> <p>Necesita poco espacio para su implantación</p> <p>Válida para cualquier desnivel</p> <p>Tipo de funcionamiento discontinuo, no permite el paso continuo del caudal ecológico</p>
C	<p>Admiten cambios de dirección del flujo de hasta 180°</p> <p>Comportamiento óptimo frente a cambios del nivel de la lámina de agua</p> <p>Es uno de los más usados por facilitar el acenso del pez con un diseño aceptable</p> <p>Caudales de funcionamiento amplios (0,05-5 m³/s)</p> <p>Variedad de diseño para cualquier especie de pez</p> <p>Permite el paso de peces para todo tipo de especie</p>
D	<p>No crea ningún tipo de salto entre estanques</p> <p>Funcionamiento muy parecido a la escala de artesas</p>
E	<p>Permite pendientes fuertes.</p> <p>Aseguran una fuerte disipación de la energía en el seno del flujo de agua</p> <p>Peligro de atracones, es necesario vigilar los pasos durante el periodo de migración</p>
F	<p>Imitan las condiciones naturales de un río</p> <p>Permiten su uso como un elemento más de evacuación de caudales (compatible para el desagüe del caudal ecológico).</p> <p>Ofrecen unas condiciones de paso y remonte mucho más adecuadas (tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo).</p> <p>Exigen caudales más importantes para asegurar su funcionalidad</p> <p>Aplicables sólo para pequeñas pendientes</p> <p>Requieren una disponibilidad de espacio para poder construirse</p>
G	<p>Muy parecido a las rampas de piedra</p> <p>Funcionamiento hidráulico muy regular</p> <p>Adecuadas cuando se espera que los caudales circulantes fluctúen mucho</p>
H	<p>Imita a un río natural</p> <p>Sirve para el retorno de los peces</p> <p>Escasa pendiente limita su correcto funcionamiento</p> <p>Dentro del dispositivo se recrean las condiciones naturales de pendiente, caudal y sustrato</p>
<p>Para el uso de la tabla:</p> <p>- La columna ABR indica las características básicas del dispositivo</p> <p>- En las columnas CARACTERÍSTICAS TIPO DE DISPOSITIVO y BASES DISPOSITIVO se indica la numeración del capítulo o subcapítulo correspondiente.</p>	

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

5.2.6. BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO GENERAL DEL DISPOSITIVO

En el capítulo 3 y 4, se estudió y analizó el diseño del dispositivo de paso, en los cuales se los dividió en 3 secciones: la entrada, salida y dispositivo propiamente dicho, este subcapítulo se basará en una síntesis sobre las distintas bases y criterios, que deberían cumplirse en la entrada, salida y dispositivo, para un adecuado diseño a futuro, garantizando el funcionamiento adecuado a largo plazo del dispositivo en general, en base igual a lo antes descrito en los anteriores subcapítulos.

5.2.6.1. Entrada del dispositivo

Según la teoría antes analizada, se fijan las siguientes bases y criterios que deben tenerse en cuenta para el dimensionamiento y funcionamiento de la entrada.

- La velocidad a la salida del flujo en la entrada del paso, debe estar dentro del rango de 0,8 a 2,0 m/s (SNIP, 1987).
- El flujo de atracción debe ser dirigido desde la entrada del paso hacia la zona de concentración de tal manera que los peces sigan la dirección del flujo de agua.
- El flujo de atracción no deberá generar resalto hidráulico en la poza de entrada del dispositivo.
- Si la salida del agua es sumergida, la velocidad deberá ser mayor a 2,00 m/s.
- La pendiente de la poza que une la entrada con el fondo del río, no puede superar una pendiente mayor a 45°.
- El número de Froude, deberá ser menor a 1, para evitar que se generen resaltos hidráulicos en la poza.
- Profundidad de la poza mayor a 1 metro (Clay, 1995)
- Superficie mínima mayor a 3 metros cuadrados (Clay, 1995)
- La profundidad de la poza, desde el nivel aguas abajo del obstáculo registrado de un caudal medio, hasta el fondo de la poza será calculado

con la siguiente relación $1/3$ o $1/2$ de H , siendo H la diferencia de altura de niveles aguas arriba a aguas abajo. (Gebler, 1990).

- La longitud total de la poza, para garantizar la continuidad del río aguas abajo, deberá estar entre 7 a 10 veces H . (Gebler, 1990).
- Determinar el tipo de erosión y sedimentación a presentarse causada en la entrada del dispositivo debido a la velocidad del flujo.

5.2.6.2. Salida del dispositivo

Según la teoría antes analizada, se fijan las siguientes bases y criterios que deberán tenerse en cuenta para el dimensionamiento y funcionamiento de la salida del dispositivo, en general.

- El área de salida del dispositivo de paso deberá ser prolongado hasta la cabecera por una pared de partición, cuando se tenga velocidades de flujo en la cabecera mayores a 0,50 m/s.
- Cuando las variaciones de los niveles de flujo existentes superan 1 metro, se deberá incorporar varias salidas de ranura vertical en los diferentes niveles del paso.
- Altas turbulencias y salidas mayores a 2 m/s en el flujo del río deben ser evitadas después de la salida del paso para peces.
- La salida deberá mantenerse alejada de la coronación del azud a una distancia mayor a 2 metros, por lo general se recomienda una distancia de hasta 5 metros.
- La salida debe tener una vinculación con el fondo del río o sustrato para que los organismos acuáticos puedan orientarse con el fondo del río por lo que se recomienda el uso de una rampa de piedras que cubra el espacio entre el fondo de la cabecera del dispositivo de paso con el fondo del río.
- Se debe proveer que la salida este completamente limpia y libre de desechos por lo que se recomienda el uso de dispositivos como rejillas o sistemas flotantes, así como de un mantenimiento continuo. También debería ser posible cerrar el flujo a través de una compuerta para el control y mantenimiento.
- Profundidad de la poza mayor a 1 metro (Clay, 1995)

- Las dimensiones de la poza de salida dependerán del criterio del diseñador.
- Las rejillas deberán encontrarse lo suficientemente espaciadas, para el paso de los peces de mayor tamaño, controlando también que la velocidad que pase por las rejillas no sea mayor a 0.4 m/s, ya que de lo contrario se produciría un taponamiento natural en esta zona.

$$E = \frac{a}{a+t} \quad (5.1)$$

$$V_n = \frac{Q}{BEH_{MAX}F_S} \quad (5.2)$$

$$V_r = V_n E \quad (5.3)$$

Donde:

E : Factor adimensional

a : Espacio entre barras (m)

t : Espesor de la barra (m)

B : Ancho del canal que contiene la rejilla (m)

V : Velocidad en las cercanías a la rejilla (m/s)

V_r : Velocidad media en las barras (m/s)

H_{max} : Altura de lámina de agua (m)

F_S : Porcentaje de obstrucción se opta por el 50%

Q : Caudal que circula por el canal de entrada (m³/s)

- La pendiente de la poza de salida deberá tener un ángulo de 45°
- La profundidad de la poza será mayor a 1 m, más el calado en la entrada del flujo del dispositivo.

5.2.6.3. Cuerpo del dispositivo de paso

Se cita a continuación en forma general las bases y criterios del dispositivo de paso.

- Se recomienda que la disipación de energía en el paso no supere los 200W por metro cúbico de volumen de agua.
- La velocidad de flujo no debe superar los 2,00m/s en cualquier parte del paso sean estas en escotaduras verticales u orificios.

- La velocidad de flujo media del paso para peces debe ser menor al valor antes mencionado, el diseño de la parte inferior del paso deberá de ser áspera para que así se reduzca la velocidad.
- Para el calado mínimo de tránsito normal del pez se tomará 0.25 m más el tamaño del pez (Larinier 1998).
- Se proveerá en cualquier tipo de los diseños, tener un fondo naturalizado a manera de un sustrato de rocas de diferentes tamaños, para que el pez no pierda la conectividad existente entre el fondo morfológico del río y el dispositivo.
- El caudal circulante mínimo será el caudal ecológico calculado por la diferente metodología antes expuesta.

Las bases y criterios dependerán mucho del tipo de dispositivo a escogerse para el paso del caudal ecológico, por lo que para establecerlos se deberá revisar la tabla 5.4.

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN EN EL CASO DE UN RÍO DEL ECUADOR

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se aplicará en un ejercicio práctico lo antes estudiado y analizado, en el cual se demostrará la aplicación de las bases y criterios que intervendrán en la resolución del problema para luego aplicar al dimensionamiento del tipo dispositivo que se hubiese escogido.

6.2. EJERCICIO PRÁCTICO

En el Río Chambo ubicado en la cuenca del Pastaza se proyecta la necesidad de un dispositivo de paso para el tránsito de caudal ecológico, en una estructura de captación para el sistema de agua potable de la provincia del Puyo, este diseño contempla un dique transversal para el embalse de agua con las siguientes características:

El sistema de captación está diseñado para captar un caudal; $Q_c = 1,10 \text{ m}^3/\text{s}$ que va dirigido para el sistema de agua potable, los niveles aguas arriba y aguas abajo en el dique transversal registrado son los siguientes.

Nivel aguas arriba del embalse: 2100,00 msnm

Nivel aguas abajo del embalse: 2098,00 msnm

La diferencia de niveles aguas abajo, aguas arriba, registrados, varían entre los siguientes valores:

Diferencia de niveles (2,00-1,60) m

La diferencia de niveles en el dique aguas arriba provocados por las crecidas en temporadas de precipitación oscilan entre (0,20 a 0,45) m.

El cauce es característico de un río de montaña en la región de la sierra con las siguientes características físicas y químicas:

Velocidad del flujo cerca del obstáculo = 0,4 m/s

Temperatura= 18,90°C

El estudio hidrológico del río registro los siguientes datos:

Caudal medio anual; $Q_m = 2,50 \text{ m}^3/\text{s}$

Estudio biológico determinó la existencia de especies acuáticas entre las cuales las más relevantes fueron: Curimata (crucentina), Ciprinus carpio, Tilapia.

6.3. CÁLCULO DEL EJERCICIO

6.3.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

Para estimar el caudal ecológico se requerirá de la metodología propuesta en el capítulo dos, en el cual se explica que tipo de metodología se podría aplicar, debido a que esta tesis no está dirigido a él cálculo del caudal ecológico sino de las bases y dimensionamiento de los dispositivos de paso para transportar el caudal ecológico, se eligió estimar este resultado al rango sugerido en el capítulo dos que es entre el 10% - 30% del caudal medio anual.

Caudal medio anual; $Q_e = 2,50 \text{ m}^3/\text{s}$

Caudal ecológico; $Q_e = 10\% Q_m$

$$Q_e = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

6.3.2. ELECCIÓN DE LA ESPECIE OBJETIVO

Para estimar las capacidades de nado del pez se tendrá primero que escoger una especie objetivo, de las encontradas en el estudio biológico.

TABLA 6.1. ESPECIES DE PECES A SER ANALIZADAS

ESPECIE DE PEZ	TAMAÑO MÁXIMO	CARACTERÍSTICAS
Curimata (Crucentina)	0,20	Habita en aguas tranquilas y en corriente, se encuentra en remansos, lagunas, caños, ríos y áreas inundables, generalmente sobre fondo fangosos. Se alimenta de algas, diatomeas, bacterias. Desovan en una sola puesta al inicio de las lluvias.
Ciprinus Carpio	0,30	Casi ha desaparecido en la carpa alargada. Es una carpa de lomo alto semejante a las razas galiziana. Se encuentra en tierras bajas cálidas en ambos lados de los Andes, migran frecuentemente para el desove.
Tilapia	0,35	Se ha aclimatado en el lago de montaña Yaguarcocha a 2.190m y en los ríos de forma salvaje, con temperaturas del agua entre 16° y 20°C. Su desove es abundante. Se desarrolla mejor en las tierras bajas cálidas que en las alturas de los Andes donde desovan en mayo-junio en el norte y agosto-septiembre en el sur del país, es de importancia comercial.

Elaborado por: Daniel Tarambis y Danny Rojas

De la tabla 6.1., se puede determinar en base a lo expuesto en La Sección 5.2.21., que la especie con más relevancia para ser escogido es el Tilapia por su importancia comercial y períodos de migración.

Especie objetivo; Tilapia, *Tamaño del pez*(L_c) = 0,35m

6.3.3. UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO

Para la correcta ubicación del dispositivo, se anexa el esquema de la implantación en el Anexo N°6.1., en donde se observará lo planteado en la sección 3.4.4.

6.3.3.1. Elección del dispositivo

Para elegir el tipo de dispositivo adecuado, se basará en la tabla 5.4

En base a la diferencia de niveles máximos, en el ejercicio de 2,00m y las características más relevantes de los dispositivos, se observa en la tabla 5.4 que

el tipo dispositivo más adecuado es el de estanques con depósitos sucesivos del tipo de tabiques con orificio sumergido.

6.3.3.2.Cálculo del dispositivo de transporte del caudal ecológico

Para el cálculo del número de estanques en el dispositivo (n) se utilizará la ecuación 3.5:

$$\eta = \frac{H_{tot}}{\Delta H} - 1$$

$$H_{tot} = 2100,00\text{msnm} - 2098,00\text{msnm}$$

$$H_{tot} = 2,00\text{m}$$

$$\Delta H = 0,20 \text{ Máximo salto de agua, recomendado.}$$

$$\eta = \frac{2,00\text{m}}{0,20\text{m}} - 1$$

$$\eta = 9 \text{ Estanques}$$

Se hace necesario el cálculo del salto mínimo cuando el nivel aguas abajo sube como es el caso de nuestro ejercicio.

$$\Delta h_{min} = \frac{1,6}{n + 1}$$

$$\Delta h_{min} = \frac{1,6}{9 + 1}$$

$$\Delta h_{min} = 0.16\text{m}$$

Cálculo de las dimensiones de los estanques, tabiques y orificios se sigue el siguiente procedimiento.

Para el cálculo de las dimensiones del orificio se utilizará la ecuación 3.7

$$Q_e = \psi A_s \sqrt{2g\Delta H}$$

Donde:

Q_e :Caudal ecológico (m^3/s)

El coeficiente de descarga ψ , dependerá mucho del diseño del orificio y del sustrato de fondo se ha establecido anteriormente en la sección 3.8.4.4., un intervalo recomendado que está entre: (0,65-0,85) del cual se escogerá un valor intermedio = 0,75.

$$0,25 = 0,75A_s\sqrt{19,62 * 0,20}$$

$$A_s = 0,17 \text{ m}^2$$

$$A_s = b_s \cdot h_s$$

Como, $b_s = h_s$

$$b_s = \sqrt{0,17}$$

$$b_s = h_s = 0,41 \text{ m}$$

Para el cálculo de la velocidad (V_s) que se origina en el orificio se calculará con la ecuación 3.6.

$$V_s = \sqrt{2g\Delta H}$$

$$V_s = \sqrt{19,62 * 0,20}$$

$$V_s = 1,98 \text{ m/s}$$

$$V_s < 200 \text{ m/s} \text{ Se encuentra dentro del rango admisible}$$

El cálculo del calado mínimo (h_{min}) en el dispositivo se utilizará la siguiente ecuación.

$$hm = h + \frac{\Delta h}{2} \text{ (Teijeiro 2001)}$$

Donde:

$h = \text{Tamaño del pez}(L_c) + 0,25$ (recomendado por el análisis y estudio realizado en la tesis).

$$h = 0,70 \text{ m}$$

$$hm = 0,70 + \frac{0,20}{2}$$

$$hm = 0,80 \text{ m}$$

6.3.3.3.Cálculo de las dimensiones de los estanques

Para el cálculo de la longitud del estanque (L_b) se utilizara la ecuación 3.34

$$E = \frac{\rho g \Delta H Q}{bh(l_b - d)}$$

$$(l_b - d) = \frac{\rho g \Delta H Q}{bhE}$$

$$(l_b - d) = \frac{\rho g \Delta H Q}{bhE}$$

Donde:

d : Es el espesor del tabique de acuerdo a la recomendación de la sección 3.8.4.4., el espesor de la pared del tabique debe de ser 0,15 m.

b : Para la estimación de esta dimensión nos basaremos en la tabla 3.1., para el tamaño de pez 0,35 m, entonces el valor es 1,60m.

E : Valor de la energía disipada no mayor que 200 w/m³ recomendados en la sección 3.8.4.4. Escogeremos el valor de 180 w/m³.

$$(l_b - 0,15) = \frac{1000 * 9,81 * 0,20 * 0,25}{1,69 * 0,70 * 180}$$

$$l_b = 2,58 \text{ m}$$

La pendiente del dispositivo estará en relación con las recomendaciones que se expusieron en la sección 3.8.4.4., con la ecuación 3.4.

$$I = \frac{\Delta H}{L_b}$$

$$I = \frac{0,20}{2,58}$$

$$I = 0,078 \sim 1: 12.5; \text{ (Se encuentra dentro del rango)}$$

La altura de los tabiques intermedios se podrá calcular sumando las diferencias de niveles con el espesor del sustrato incluyendo el salto entre estanques y profundidad del tabique en la rampa del hormigón.

a) *Tabique aguas abajo (h_{wi})*

$$h_{wi} = z + e_s + \Delta h_{min} + p + seg$$

Donde:

seg: Rango de seguridad 0,15 m, recomendado

es: Espesor del sustrato (m)

p: Profundidad del tabique en la rampa de hormigón (m)

$$z = (2098,40 - 2097,30)msnm$$

$$z = 1,10 \text{ m}$$

$$h_{wi} = 1,10 + 0,20 + 0,16 + 0,10 + 0,15$$

$$h_{wi} = 1,71 \text{ m}$$

b) *Tabique aguas arriba (h_{ws})*

$$h_{ws} = y + e_s + p + seg$$

Donde:

$$y = (2100,00 - 2099,10)msnm$$

$$y = 0,90 \text{ m}$$

$$h_{ws} = 0,90 + 0,20 + 0,10 + 0,15$$

$$h_{ws} = 1,35 \text{ m}$$

c) *Tabique interior (h_w)*

El cálculo se determina en forma de tabla, siendo N una variable para que los tabiques cumplan con la disposición de diferencia de nivel planteado en el problema.

$$\Delta H + \Delta h_{min} = \text{Diferencia de nivel en el último estanque}$$

$$0,20 + 0,16 = 0,36 \text{ m}$$

$$N = \text{diferencia de nivel aguas abajo} - \text{diferencia de nivel en el último estanque}$$

TABLA 6.2. ALTURA DE LOS TABIQUES INTERIORES DEL DISPOSITIVO

Tabique	es+p+h+0.15+Δh _{min}	N	H _w (m)
H_{ws}	1,31	0,04	1,35
2	1,31	0,08	1,39
3	1,31	0,12	1,43
4	1,31	0,16	1,47
5	1,31	0,2	1,51
6	1,31	0,24	1,55
7	1,31	0,28	1,59
8	1,31	0,32	1,63
9	1,31	0,36	1,67

Elaborado por: Danny Rojas y Daniel Tarambis

6.3.3.4. Longitud total del dispositivo

$$L_{total} = l_b \cdot n$$

$$L_{total} = 2,58 \cdot 9$$

$$L_{total} = 23,22 \text{ m}$$

La altura de las paredes del dispositivo se obtendrá de acuerdo a la figura 3.21 y el espesor de acuerdo con la sección 3.8.4.4.

$$h_{pd} = H_w \text{ del Penúltimo tabique} + 0,30$$

$$h_{pd} = 1,67 + 0,30$$

$$h_{pd} = 1,97 \text{ m} \approx 2,00 \text{ m}$$

6.3.3.5. Velocidad máxima del pez

Para facilitar el cálculo de estas variables se escogió utilizar los ábacos, el investigador podrá hacer uso de cualquiera de las dos opciones nombradas en el capítulo cinco.

La velocidad máxima de nado (V_{MAX}) se determinará con ayuda de la figura 5.1

$$V_{MAX} = 5,10 \text{ m}$$

El tiempo de permanencia (T_p) que puede mantener el pez con una velocidad de nado normal se puede calcular con la ayuda de la figura 5.2.

$$T_p = 7,10 \text{ s}$$

La velocidad de nado (V_n) se puede determinar con la figura 5.3

$$V_n = 3,60 \text{ m}$$

Con la ecuación 4.6 se puede determinar la distancia recorrida del pez en un tiempo en este caso en el tiempo de permanencia y a una velocidad que es la velocidad de nado.

$$d_r = (V_n - V_d) \cdot t_p$$

Donde:

V_d : Velocidad máxima en el dispositivo ($V_d = V_s$)

$$d_r = (3,60 - 1,98) \cdot 7,10$$

$$d_r = 12,99 \text{ m}$$

$$d_r > l_b \text{ El pez franquea el obstáculo}$$

Si la distancia $d_r <$ longitud del estanque se tendrá que recalcular las dimensiones del dispositivo, en caso contrario el pez puede franquear el obstáculo.

6.3.3.6. Entrada del dispositivo

La corriente de atracción a la entrada (V_a) del dispositivo, en este caso es la velocidad del flujo en el ultimo orificio.

$$V_a = \sqrt{2g\Delta H}$$

$$V_a = \sqrt{19,62 \cdot 0,20}$$

$$V_a = 1,98 \text{ m/s}$$

V_a entre (0,80 – 2,00)m/s (SNIP 1987) Sección: 5.2.6.1

Y en el caso de que el salto sea (Δh_{\min})

$$V_a = \sqrt{2g\Delta h_{\min}}$$

$$V_a = \sqrt{19,62 \cdot 0,16}$$

$$V_a = 1,77 \text{ m/s}$$

V_a entre (0,80 – 2,00)m/s (SNIP 1987) Sección: 5.2.6.1

Poza a la entrada del dispositivo

Para el cálculo de la poza de salida del flujo por el dispositivo, se aplicará lo antes analizado en el capítulo 5 en la Sección: 5.2.6.1

Altura de la poza (h_{poza}) desde el pie del último tabique del dispositivo;

$$(h_{poza}) = 1/2 H_{tot}; \text{ (Gebler, 1990). Sección 5.2.6.1}$$

$$(h_{poza}) = \frac{1}{2} \cdot 2$$

$$(h_{poza}) = 1 \text{ m}$$

Longitud de la poza (L_{poza}) desde el pie del último tabique del dispositivo;

$$(L_{poza}) = 7 \text{ m (Gebler, 1990). Sección 5.2.6.1}$$

Ancho de la poza (b_{poza});

De la Sección 5.2.6.1 se recomienda que la superficie de la poza sea mayor a 3 m².

$$(b_{poza}) = b + 1$$

$$(b_{poza}) = 1,60 + 1$$

$$(b_{poza}) = 2,60 \text{ m}$$

$$\text{Superficie de la poza} = (b_{poza}) \cdot (L_{poza})$$

$$\text{Superficie de la poza} = 18,2 \text{ m}^2 \text{ Cumple con la disposición.}$$

Para que exista una conexión con el sustrato de fondo del río se aplica la recomendación de diseñar una rampa de 45°, que una el pie de la entrada con el fondo de la poza.

6.3.3.7. Salida del dispositivo

Control de desechos y sedimentos

El estudio de sedimentación y erosión en el río entregará un resultado en el cual debido a la fuerte velocidad del flujo existe material vegetal y sedimentos en suspensión.

Por lo cual se opta en fabricar una rejilla de protección en la entrada del flujo del dispositivo, conforme a lo recomendado en la sección 5.2.6.2.

Las rejillas deberán encontrarse suficientemente espaciadas, para el paso de peces de mayor tamaño, controlando que la velocidad (V_o), que pase por las rejillas no sea mayor a 0.4 m/s, (Tabla N° 4.5) ya que de lo contrario se produciría un taponamiento natural en las zona las rejillas.

Barrotes de forma cuadra de espesor (a) = 0,30 m, asumido

Espacio entre las barras (t) = 0,02 m, asumido

$$E = \frac{a}{a + t}$$

$$E = \frac{0,30}{0,30 + 0,02}$$

$$E = 0,94$$

$$V_n = \frac{Q}{BEH_{MAX}FS}$$

Entonces

$$V_r = V_n E$$

$$V_r = 0,40 \cdot 0,94$$

$$V_r = 0,38 \text{ m/s}$$

$V_r < V_o$ Cumple con lo recomendado

Donde:

E : Factor adimensional

a : Espacio entre barras (m)

t : Espesor de la barra (m)

B : Ancho del canal que contiene la rejilla (m)

V : Velocidad en las cercanías a la rejilla (m/s)

V_r : Velocidad media en las barras (m/s)

H_{max} : Altura de lámina de agua (m)

F_s : Porcentaje de obstrucción se opta por el 50%

Q : Caudal que circula por el canal de entrada (m³/s)

Poza a la salida del dispositivo

Para la poza de salida del flujo por el dispositivo, se aplicará lo antes analizado en el capítulo 5 en la Sección: 5.2.6.1

Altura de la poza (h_{poza}) desde el pie del último tabique del dispositivo;

$$(h_{poza}) = 1/2 H_{tot}; \text{ (Gebler, 1990). Sección 5.2.6.2}$$

$$(h_{poza}) = \frac{1}{2} \cdot 2$$

$$(h_{poza}) = 1 \text{ m}$$

Longitud de la poza (L_{poza}) desde el pie del último tabique del dispositivo;

$$(L_{poza}) = 7 \text{ m (Gebler, 1990). Sección 5.2.6.2}$$

Para que exista una conexión con el sustrato de fondo del río se aplica la recomendación de diseñar una rampa de 45°, que una el pie de la entrada con el fondo de la poza.

En la salida del dispositivo se diseñará un canal de las mismas dimensiones de los estanques en el que se ubicará una rejilla, las dimensiones del canal son:

Ancho: 1,60 m

Longitud: 2,00 m

CAPÍTULO 7

MONOGRAFÍA DE DISEÑO

7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se entregará un mapa conceptual detallado en el Anexo N° 5 adaptado a un esquema sucesivo y consecuente de los parámetros estudiados y analizados en los capítulos anteriores, de una manera didáctica y entendible para proporcionar un plan de diseño de un dispositivo de paso para el tránsito de caudal ecológico, brindando con esto al lector una guía veraz y legible, para aplicarlas al diseño de distintos dispositivos de paso para peces que puedan ser empleados en los diferentes proyectos hidráulicos.

7.2. PLAN DE DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

En el mapa conceptual nombrado como plan de diseño de un dispositivo de paso para el tránsito de caudal ecológico, que se presenta en el Anexo N°5, se expone los parámetros que intervienen con el fin de analizar y determinar las bases y criterios generales en el diseño y dimensionamiento, esta distribución conceptual ayudará a entender de mejor manera el tema propuesto, debido a que el plan de diseño parte desde la consideración de los factores más importantes que intervienen en una implantación de un dispositivo, para luego analizarlas, estudiarlas y terminar con sus respectivos parámetros de diseño a utilizarse.

El plan está conformado en su estructura por dos mapas conceptuales una que parten de la consideración de los factores más importantes, los cuales analizan los parámetros principales con el fin de establecer las bases y diseños generales del dispositivo para su implantación, y luego proseguir con otro mapa conceptual en el cual se despliegan las bases y criterios de cada uno de los tipos de dispositivos de paso de caudal ecológico.

En el diseño del mapa conceptual se propone un previo análisis y estudio de la definición de caudal ecológico para establecer con mejor claridad el tema de análisis ya que es el caudal que deberá transportarse por el dispositivo.

El mapa conceptual se basará en los factores más importantes los cuales son: biológicos, hidrológicos, hidráulicos y topográficos, que en sí engloban todos los parámetros a determinarse, entre estos se tendrá:

- Velocidad del flujo, pendiente del cauce, erosión que produce el cauce, arrastre de sedimentos.
- Niveles máximos y mínimos en el obstáculo, caudales máximos y mínimos, temporadas de precipitación y estiaje, relación caudal calado en el río.
- Implantación de la obra, niveles de fondo del río aguas abajo y arriba del río cercanos al obstáculo.
- Capacidades de nado del pez, características biológicas, comercio y temporadas de migración y desove.

Las bases y criterios generales que deberán determinarse para el dimensionamiento del dispositivo son los siguientes:

- Caudal ecológico
- Tipos de obstáculos a presentarse en el curso natural del río
- Capacidades de nado del pez
- Elección del pez objetivo
- Ubicación del dispositivo
- Elección del tipo de dispositivo de paso
- Entrada y salida del dispositivo
- Cuerpo del dispositivo

A continuación de las bases y criterios generales, se expondrá las bases y criterios de los diferentes tipos de dispositivos de paso para su posterior cálculo y dimensionamiento.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- La construcción de diques transversales para embalse de agua en los diferentes ríos del Ecuador y la falta de normas en el tema de caudal ecológico, en conjunto con la falta de estudios de diseño y eficiencia de los distintos dispositivos de transito de caudal ecológico en el país, han contribuido a la desaparición de especies acuáticas, el desarrollo de esta tesis ayudará a que en el futuro se lleven estudios más a fondo sobre el tema y que se forjen las bases adecuadamente como norma general para el dimensionamiento de estos dispositivos con el fin de asegurar los ecosistemas.
- La construcción de un dispositivo de acenso para el paso de peces solo se justificaría cuando existan especies migradoras y que estas hayan sido seleccionadas como especies objetivo o insignia, para esta selección se requiere de un estudio exhaustivo de las especies de peces que actualmente en el Ecuador se carece de esta información, por lo que se requiere urgentemente que se proponga dicho análisis.
- Con un correcto análisis de las velocidades que se presentan aguas abajo del dique transversal, resultante del diseño del mismo, del régimen hidrológico del río y de las trayectorias que toman los peces en dirección al dique u obstáculo se ubicará la entrada al dispositivo. Este será un proceso iterativo que podría generar el requerir el diseño de estructuras suplementarias aguas abajo del dique.
- El análisis del uso de las pozas conformará una parte necesaria y fundamental en la conformación del dispositivo así como también en el buen funcionamiento del mismo, por lo que se determina que este no sólo servirá para disipar energía sino también para ayudar a estabilizar la relación que tiene el pez con la continuidad del río contribuyendo con la correcta trayectoria que deba seguir el pez en su migración.

- La gran información obtenida en base de experiencias y evaluaciones de dispositivos de tránsito de caudal ecológico de distintos autores internacionales han ayudado a establecer el objetivo principal de esta tesis que es el de determinar y proponer las bases y criterios de diseño para el dimensionamiento de los dispositivos por lo que se entrega un plan que ayude a contribuir en conjunto con la experiencia del profesional y dimensionar las estructuras para que estas sean funcionales.
- Se ha estudiado la relación entre la velocidad del pez, la velocidad del flujo en el río y en el dispositivo, donde se ha establecido en base a las experiencias de los diferentes autores de los libros estudiados un limitante de velocidad en esta tesis, como la máxima velocidad del flujo en diferentes partes del dispositivo para que el pez cumpla con el objetivo de franquear y completar su migración.
- El estudio de la morfología del río y de los parámetros que en este intervienen han ayudado a establecer los ítems de análisis antes de dimensionar un dispositivo de paso de caudal ecológico y en sí su correcta ubicación por lo que se convierte en un factor importante a ser analizado por el profesional.
- El esfuerzo proyectado en esta tesis direccionada a la investigación y análisis de estos dispositivos, debe ser aprovechado con el fin de asegurar la existencia de los ecosistemas acuáticos de forma que las generaciones futuras puedan aprovechar las riquezas naturales de nuestros ríos.
- Se ha establecido un plan de diseño de un dispositivo de paso para el tránsito de caudal ecológico, el cual en forma a manera didáctica y entendible, resume lo estudiado y analizado en esta tesis, para que pueda ser utilizado y aplicado por el investigador.
- Se ha establecido un capítulo en el cual se analiza de forma objetiva, las diferentes problemáticas que puedan existir en las implantaciones de estos dispositivos, con el fin de entregar soluciones técnicas y objetivas para el correcto diseño del dispositivo.
- Se ha analizado en base a lo estudiado la situación actual de los ríos del Ecuador con el fin de aplicar lo estudiado en esta tesis para los diferentes proyectos a ser implementados en el país.

- El problema de la erosión y sedimentación sobre todos en ríos de alta montaña han inducido a que en esta tesis, se analice la problemática provocada por estos factores físicos en los ríos y dispositivos, entregando así soluciones y recomendaciones que ayuden a mitigar el factor de impacto, provocados en el diseño del dispositivo y en su construcción.
- Se han estudiado las relaciones entre los caudales máximos y mínimos y la variabilidad de niveles que estos provocan, causando que existan perturbaciones en la entrada y calados mínimos que afectan a la correcta funcionabilidad de los dispositivos, debido a que el pez no puede atravesar el dispositivo, es por esto que se plantea posibles soluciones para estos problemas.
- Se estudió y analizó el problema de acumulación de sedimentos y material flotante encontrados en la entrada y salida del dispositivo, llegándose a una conclusión de que necesariamente se tenía que recurrir a estructuras especiales que ayuden a mitigar estos problemas.
- Se concluye que para una correcta funcionabilidad del dispositivo estos posean de un caudal de atracción al pez en la entrada del dispositivo, procurando así obtener una velocidad mínima, que pueda asegurar el ingreso de las diferentes especies acuáticas.

8.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda al investigador el estudio y la utilización de las tablas proyectadas, ya que estas se realizaron con el objetivo de sintetizar el análisis de las problemáticas y soluciones, así como también el de contribuir con la temática propuesta.
- Se recomienda para un correcto diseño de los diferentes tipos de dispositivos de paso de tránsito de caudal ecológico, tener un salto no mayor a 0,20 cm, para no tener turbulencias excesivas que perturben al comportamiento del pez, aguas abajo del obstáculo.
- Se recomienda un correcto control de estos dispositivos especiales para evitar la acumulación de sedimentos, debido a que la funcionabilidad de estos dispositivos dependen tanto de su diseño, como también de su mantenimiento y operación.
- No se recomienda la utilización de ascensores, cuando se tiene especies pequeñas, debido a que se necesitaría utilizar rejillas muy finas, haciéndose muy complicado tener una buena funcionabilidad del ascensor.
- Se recomienda, para el correcto transporte de caudal ecológico preferiblemente no utilizar los dispositivos discontinuos, debido a que estos no permiten un tránsito de caudal de manera continua por el curso natural del río y si necesariamente se utilizarían estos dependerán de una estructura conjunta para cumplir con la disposición del transporte del caudal ecológico.
- Se recomienda en la mayoría de los dispositivos tener disipaciones de energía menores a 200 W/m^3 y en el caso de los estanques de descanso de los ralentizadores menores a 50 W/m^3 , para garantizar la funcionabilidad del mismo, además del correcto transporte de los peces a lo largo del dispositivo a ser utilizado.
- Se recomienda de preferencia utilizar rejillas en las salidas de los dispositivos, de malla cuadrada, rectangular o barrotes de sección rectangular y no los circulares, debido a la mejor rugosidad que presentan las anteriormente nombradas.

- Fluvialmente, se debe evitar en lo posible tener zonas de recirculación y turbulencia, que puedan causar en un inmediato futuro una desorientación del pez.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. Tharme R (2003). A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers. Volumen 19, pp. 397–441, South África.
2. L. Tennant (2011). Prescripción de régimen de caudales ecológicos para peces, fauna, recreación y demás relacionados con los recursos medio ambientales, Presentación Jay O' Keeffe, UICN Sur, Marco Aguirre, Vallenar.
3. L. Rodríguez-Gallego, C. Chreties, M. Crisci, M. Fernández, N. Colombo, B. Lanzilotta, M. Saravia, C. Neme, V. Sabaj & Conde D (2002). Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Vida Silvestre Uruguay UICN – Sur.
4. Fish Passes (2002). Design Dimensions and monitoring. Rome
5. B. Varona (2009). Estudio teórico de pasos de peces y desarrollo de una Metodología de evaluación de su eficacia. España.
6. R. Quiroz (1998). Estructuras para asistir a los peces no salmónidos en sus migraciones: América Latina. Roma.
7. A. Morán González (2009). Estudio Para La Mejora Hidráulica Y Adecuación Ambiental De Torneros De La Valderia. Universidad Politécnica De Madrid.
8. Confederación Hidrográfica del Ebro (2009). Pasos De Peces Para Permeabilizar Estructuras Transversales en la Cuenca del Río Ebro. España.

9. Consejo Nacional de Recursos Hídricos (2002). Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la República del Ecuador (2009). Anuarios Hidrológicos. República del Ecuador.
10. <http://www.searchfish.org/fish/1565/brycon-dentex> (1996). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe al Gobierno del Ecuador sobre Pesca Continental y Piscicultura. FAO. Arno Meshkat.
11. M Acreman & Dunbar MJ. (2004). Defining environmental river flow requirements. A review. Hydrology and Earth System Sciences. 8(5):861-876.
12. A Eguía & González Villela R. (2007). Introducción a los caudales ambientales. En: Requerimientos para implementar caudal ambiental en México. Alonso Eguía Lis P, Gómez Balandra MA & Saldaña Fabela P (Eds.). IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-SEMARNAT. WWF. México.
13. ARMCANZ Y ANZECC (1996). National Principles for the Provision of Water for Ecosystems, Sustainable Land and Water Resources Management Committee, Subcommittee on Water Resources. <http://www.environment.gov.au/water/publications/environmental/ecosystems/pubs/water-provision.pdf>
14. Arthington A H, R S Tharme, S O Brizga, B J Pusey & M J Kennard (2004). Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies: 37–65. In: Welcomme RL & Petr T (Eds.). Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries Volume II. RAP Publication 2004/17. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand.
15. Barrios E, Barajas N, Rodríguez A & González I (2007). Three models for implementation of environmental flows in Mexico. 2007 Proceeding on 10th International Riversymposium and Environmental Flows Conference. Brisbane, Australia.
16. Bejarano MD, Sordo A, Marchamalo M & García de Jalón D (2010). Caudales ambientales a escala regional: una metodología basada en la clasificación de la variabilidad hidrológica natural. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IHAR-LAD.

17. Brown C, Pemberton C, Birkhead A, Bok A, Boucher C, Dollar E, Harding W, Kamish W, King J, Paxton B and Ractliffe S (2006). In support of water-resource planning – highlighting key management issues using DRIFT. A case study. Water SA (on-line). 32(2):181-191.
18. Calvo Alvarado JC, JA Jiménez, E. González, F Pizarro & A Jiménez (2008). Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. Kurú 5(13).
19. Chreties C, Rodríguez-Gallego L, Texeira L & Conde D (2009). An ecological-hydrodynamics integrated methodology for sustainable management of Maldonado wetland. 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Biennial Congress: “Water Engineering for a Sustainable Environment”, Vancouver.
20. Díez Hernández JM (2008). Evaluación de requerimientos ecológicos para el diseño de regímenes ambientales de caudales fluviales. Revista de ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá: 15-23.
21. BLESS, R., A. LELEK & A. WATERSTRAAT (1994): Rote Liste und Artenverzeichnis der in Deutschland in Binnengewässern vorkommenden Rundmäuler und Fische (Cyclostomata & Pisces). In: NOWAK, E., J. BLAB & R. BLESS (Hrsg.): Rote Liste der gefährdeten Wirbeltiere in Deutschland. – Greven (Kilda-Verlag), 137-156.
22. DVWK (1991). Ökologische Aspekte bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern – DVWK Merkblatt 204, Bonn, 188 S. JONSSON, N. (1991): Influence of water flow, water temperature and light on fish migration in rivers. Nordic J. Freshw. Res. 66, 20-35.
23. KRÜGER, F., P. LABATZKI & J. STEIDL (1993): Naturnahe Gestaltung von Fischaufstiegsanlagen; Beispiele in Brandenburg. Wasserwirtschaft/ Wassertechnik, 1/93, 27-33.
24. LARINIER, M. & F. TRAVADE (1992). La conception des dispositifs de franchissement pour les Aloses. Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 125-133.
25. Balairón, L.J. (2007). Estudio de la Eficacia de las escalas de peces. CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) Ministerio de Fomento.
26. Chow, V.T. (2000). Hidráulica de canales abiertos. MC Graw Hill.

27. Clay, C.H. (1995). Design of fishways and other fish facilities. Lewis Publishers.
28. Larinier M. (1998). Upstream and downstream fish passage experience in France. Fishing News Books, Oxford.
29. Zhou, Y. (1982). The swimming behaviour of fish in towed gears: areexamination of the fish principles. Dept. Agric. Fish. Scotland. Work. Pap. 4.
30. Clay C.H. (1995). Design of fishways and other fish facilities. Lewis Publishers. CRC Press. Boca Raton, Florida.
31. Elvira B. Nicola G. Almodovar. A. (1998). Sistemas de paso para peces en presas. CEDEX. Ministerio de Fomento. 113 p.
32. Odeh. M. (2000). Advances in fish passage technology: Engineering design and biological evaluation. American Fisheries Society. Bethesda. Maryland.
33. Pena. L. Puertas. J. Fraga. S. Teijeiro. T. (2004). Escalas de peces: Una solución al efecto barrera de las obras hidráulicas transversales. La situación "gallega" .II Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Territorio y Medio Ambiente. Santiago de Compostela.
34. Teijeiro (2001). Criterios de diseño de escalas de peces de hidráulica vertical. Tesis Doctoral. Dpto. Enxeñaría Agroforestal. Universidade de Santiago de Compostela.

ANEXOS

ANEXO N°1

FOTOS DE DIFERENTES TIPOS DE OBSTÁCULOS PRESENTES EN LOS RÍOS

FOTO 1.1. VISTA DE LA PRESA DE CERECEDA Y DE LA ESCALA DE PECES DE ARTESAS CON VERTIDO LIBRE CONSTRUIDA EN LA MARGEN DERECHA. RÍO EBRO (BURGOS)



Fuente: Pasos de peces para permeabilizar estructuras transversales en la cuenca del río Ebro, Confederación Hidrográfica del Ebro, España, Julio 2009.

FOTO 1.2. VISTA DE UN AZUD PARA DERIVACIÓN EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO MATARRAÑA (T.M. MAELLA, ZARAGOZA) QUE CUENTA CON ESCALA DE PECES DE ARTESAS EN VERTIDO LIBRE.



Fuente: Pasos de peces para permeabilizar estructuras transversales en la cuenca del río Ebro, Confederación Hidrográfica del Ebro, España, Julio 2009.

ANEXO N°2

FOTOS DE DIFERENTES TIPOS DE DISPOSITIVOS DE PASO PARA EL TRÁNSITO DE CAUDAL ECOLÓGICO

FOTO 2.1. ASCENSORES PARA PECES EN FUNCIONAMIENTO EN FRANCIA.

Fuente: CERM, Centro de Estudios del Río Mediterráneo, LINKIT CONSULT & WANNINGEN WATER CONSULT, Confederación Hidrográfica del Ebro, 24 de Julio 2009, España.

FOTO 2.2 DE IZQUIERDA A DERECHA. VISTA DE UNA ESCALA DE ARTESAS CON ESCOTADURAS LATERALES EN EL RÍO DUERO (ESPAÑA) - VISTA DE UNA ESCALA DE ARTESAS DE TABIQUES VERTIENTES EN EL RÍO CÁRDENAS (ESPAÑA).

Fuente: Pasos de peces para permeabilizar estructuras transversales en la cuenca del río Ebro, Confederación Hidrográfica del Ebro, España, Julio 2009.

FOTO 2.3. VISTA DE UNA RAMPA DE PIEDRAS EN EL RÍO PISUERGA (BURGOS)



Fuente: Pasos de peces para permeabilizar estructuras transversales en la cuenca del río Ebro, Confederación Hidrográfica del Ebro, España, Julio 2009.

FOTO 2.4. VISTA DESDE AGUAS ARRIBA EN AGUAS BAJAS DONDE SE APRECIA EL TIPO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS PIEDRAS INTRODUCIDAS EN LA RAMPA.



Fuente: Rampa de peces de Ramacastañas, I. Arenillas Girola, 1985

FOTO 2.5. ESCALA DE RALENTIZADORES DE FONDO EN LA FASE DE EXPLOTACIÓN.



Fuente: www.allendale.journallive.co.uk

FOTO 2.6. DETALLE DE BLOQUES DE PIEDRA EN UN RÍO ARTIFICIAL



Fuente: Pasos de peces para permeabilizar estructuras transversales en la cuenca del río Ebro, Confederación Hidrográfica del Ebro, España, Julio 2009.

FOTO 2.7. PASO DE ESCOTADURA VERTICAL CON UNA SOLA ESCOTADURA, PRESA VEAZIE, ALEMANIA.



Fuente: Diadromous Fish Passage, National Oceanic Atmospheric Administration, 2006

ANEXO N°3

SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL MEDIO FLUVIAL EN EL ECUADOR

ANEXO N°4

TIPOS DE PECES PRESENTES EN ECUADOR

ANEXO N°5

PLAN DE DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PASO PARA EL TRÁNSITO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

ANEXO N°6

DISEÑO DEL EJERCICIO PRÁCTICO DE LA ESCALA DE ESTANQUES SUCESIVOS