RESUMEN

El proyecto hidroeléctrico “San Bartolo” cuya obra de captación se construirá sobre el Río Negro en la provincia de Morona de Santiago, para analizar los efectos que esta obra tendrá sobre la morfología del cauce natural se optó por la implementación de un modelo hidráulico para la optimización del diseño.

Para la optimización de la obra en la presente investigación se prevé la implementación de un modelo físico con la finalidad de realizar un estudio detallado en cuanto a las características y comportamientos morfológicos del cauce asociadas con procesos de erosión, transporte y sedimentación. La predicción de cambios en la forma de un rio es importante para la selección de la ubicación de una obra y protección de las estructuras.

El estudio será abordado de tal forma que se considerara aspectos cualitativos tales como pendientes longitudinales, caudal líquido, zonas potenciales de erosión o depositación, velocidad y flujo, etc.

En primer lugar se establecerá el caudal formativo y otros caudales de interés para lograr un mejor entendimiento del comportamiento morfológico. En base al espacio disponible, a su capacidad de suministrar un caudal máximo se establecerá una escala para el modelo. Se construirá y calibrará el modelo con la escala reducida sin tomar en cuenta el efecto de la obra de captación proyectada, identificando zonas de erosión y depositación de material. Finalmente se coloca la obra y se realizaran estudios con diferentes caudales observando su efecto modificador en el cauce, velocidad y dirección de flujos preferenciales, formación de vórtices causantes de erosión

PALABRAS CLAVE: morfología, dunas, erosión, sedimentación, embalse.

CONTENIDO

RESUMEN 1
LISTA DE ABREVIATURAS Y TÉRMINOS: 9
INDICE DE FIGURAS 10
INDICE DE TABLAS 10
INDICE DE FOTOS 11
DEDICATORIA: 13
AGRADECIMIENTO: 14
CAPITULO I. 15
1. INTRODUCCIÓN 15
1.1. ANTECEDENTES: 15
1.2 . ALCANCE: 15
1.3. OBJETIVOS 16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL: 16
1.4. JUSTIFICACIÓN: 16
CAPITULO II. 17
2. MARCO TEORICO 17
2.1. CARACTERISTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS MORFOLOGICOS 17
2.1.1. EROSIÓN 17
2.1.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS 20
2.1.3. SEDIMENTACIÓN 24
2.2. HIDROLOGIA FLUVIAL 26
2.2.1. CAUDAL DOMINANTE 27
2.3. MODELOS HIDRÁULICOS 27
2.3.1. GENERALIDALES 27
2.3.2. MODELO NO DISTORSIONADO 28
2.3.3. LECHO MOVIL 28
CAPITULO III. 32
3. MATERIALES Y MÉTODOS 32
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SAN BARTOLO 32
3.2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MODELO MORFOLOGICO DEL RÍO NEGRO. 34
3.2.1. CONSIDERACIONES DE ORDEN HIDROLÓGICO PARA EL MODELO 34

3.2.2. CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DEL CAUCE. 35
3.3. CONCEPTUALIZACIÓN PARA EL MODELO 38
3.4. ESCALAMIENTO DEL MODELO Y DEL HIDROGRAMA 39
3.4.1. ESCALAMIENTO DEL MODELO: 39
3.4.2. ESCALAMIENTO DEL HIDROGRAMA: 40
3.5. EQUIPOS Y LABORATORIO 41
3.5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL PARA LA CONFIGURACIÓN DEL MODELO: 41
3.6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO: 43
3.6.1. CONFIGURACIÓN DEL CAUCE: 43
3.6.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN: 43
3.7. ESTRUCTURACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ESTUDIO. 44
3.7.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO: 44
3.7.2. EMPLAZAMIENTO DE LA OBRA 45
3.7.3. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES: 46
CAPITULO IV 47
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 47
4.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO 47
4.2. EMPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA 54
CAPITULO V 74
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 74
BIBLIOGRAFIA 79
ANEXOS 81

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Tatiana del Roció Alarcón Morales, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Tatiana del Rocío Alarcón Morales
010448639-4

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Tatiana del Roció Alarcón Morales, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

TAH ALARCÓN

Tatiana del Rocío Alarcón Morales
010448639-4

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Ruth Noemí Once Sarmiento, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Ruth Noemí Once Sarmiento
1400775001

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999
Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Ruth Noemí Once Sarmiento, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Ruth Noemí Once Sarmiento
1400775001

UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FUNDADA EN 1987

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

"ESTUDIO CUALITATIVO DEL MODELO MORFOLÓGICO DE LA CONFIGURACIÓN DE TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN PARA UNA OBRA DE CAPTACIÓN EN EL RÍO NEGRO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SAN BARTOLO "

Director:

Ing. Felipe Cisneros Ph.D

Proyecto de graduación

previo la obtención de grado

de Ingenieros Civiles

Tutor:

Ing. Verónica Carrillo

Autores:

Tatiana del Rocío Alarcón Morales

Ruth Noemí Once Sarmiento

Cuenca- Ecuador
Octubre 2012

LISTA DE ABREVIATURAS Y TÉRMINOS:

Q_m	Caudal modelo
Q_p	Caudal prototipo
V_m	Velocidad en el modelo
V_p	Velocidad en el prototipo
L_m	Longitud en el modelo
L_p	Longitud en el prototipo
H_m	Altura o profundidad en el modelo
H_p	Al tura o profundidad en el prototipo
B_m	Ancho en el modelo
B_p	Ancho en el prototipo
A_m	Área en el modelo
A_p	Área en el prototipo
λv	Escala de velocidades
λl	Escala Longitudinal
λa	Escala de áreas
λq	Escala de caudales
T_s	Tasas de transporte de sedimentos en el modelo
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
PROMAS	Programa para el Manejo del Agua y el Suelo

INDICE DE FIGURAS

Fig 2.1. Características del flujo alrededor de la pila (GITS, 2001) 19
Fig 2.2. Rizos, dunas, lecho plano, antidunas, rápidos y pozos (Galiano y Toapaxi, 2010) 21
Fig 2.3.Zonas de erosión y depositación dentro de la curva (Universidad del Cauca, Morfología Fluvial, 2003)..... 23
Fig 2.4. Perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un rio 24
Fig 2.5.Sedimentación esperada en un embalse. (Rocha, 1998)..... 25
Fig 2.6. Curva de caudales clasificados y características de un hidrograma (Martin Vide, 2003)..... 27
Fig 3.1. Esquema de la obra de captación y conducción 32
Fig 3.2. Ubicación de la cuenca del rio Negro. 33
Fig 3.3. Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo” 34
Fig 3.4. Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años..... 35
Fig 3.5. Esquema geomorfológico..... 37
Fig 3.6. Zona geológica del proyecto 38
Fig 3.7. Hidrograma para el modelo 40
Fig 4.1. Esquema de ubicación de zonas características y zonas. 50
Fig 0.1. Esquema de ubicación de las secciones de control en la cola del embalse..... 83

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Factores de escala 31
Tabla 3.1. Caudales medios mensuales en los sitios de toma del aprovechamiento Copal- San Bartolo..... 35
Tabla 3.2. Hidrograma para el modelo 41
Tabla 3.3. Características de la bomba Hidráulica 41
Tabla 4.1. Caudales para calibración del modelo..... 48
Tabla 4.2. Tasas de Transporte de fondo Calibradas para el Modelo..... 53
Tabla 4.3. Dunas y zonas de erosión con emplazamiento de la obra 55
Tabla 4.4. Resultados de velocidades de los ensayos. 55
Tabla 4.5. Tabla de velocidades para caudales entre 100-180 m^3 /s..... 60
Tabla 4.6. Caudales ensayados con estas condiciones. 60
Tabla 4.7. Caudales ensayados con la obra de lavado del margen izquierdo y la plataforma de disipación 63
Tabla 4.8. Velocidades en la zona de embalse por efecto de la obra de lavado margen izquierdo..... 63

Tabla 4.9. Dunas y zonas de erosión (zonas) por efecto de las obras complementarias 64
Tabla 4.10. Caudales ensayados con cambio de geometría de las pilas 69
Tabla 4.11. Dunas y zonas de erosión (zonas) por efecto de las obras complementarias y cambio geometría de las pilas 70
Tabla 4.12. Caudales de los ensayos con la piscina de disipación 71

INDICE DE FOTOS

Foto 1. Amplia zona cóncava aguas abajo del lugar de emplazamiento 36
Foto 2. (Derecha). Boleos de hasta 2 m en el lugar de emplazamiento de la obra. 37
Foto 3. Bomba bombeo y controles electrónicos 42
Foto 4.Compuerta y tanques de sálida 43
Foto 5. Construcción del cauce del Río Negro 43
Foto 6. (Arriba). Fotos de la estructura de la obra de captación 44
Foto 7.Lecho del cauce durante la calibración del modelo. 47
Foto 8. Zonas de sedimentación y erosión del material 47
Foto 9. Calibración del lecho, con lecho rocoso 48
Foto 10. Zona de sedimentos Foto 11.Formación de dunas en la zona del embalse.
Foto 12. Erosión aguas abajo en la zona cóncava. 50
Foto 13. (Izquierda) material granular transversal en el embalse 51
Foto 14. (Izquierda) Dunas pronunciadas (Derecha) Desaparición de dunas 51
Foto 15. Erosión márgenes cola del embalse 52
Foto 16. (Izquierda) erosión sección de control con un caudal de 300m^3/seg, (Derecha) sedimentación sección de control con un caudal de 100 m^3/seg 52
Foto 17.(Izquierda) Zona de embalse con un caudal de 300 m^3/seg , ... 52
Foto 18. (Izquierda) Flujo principal(Derecha) Zona muerta, acumulación de material fino 53
Foto 19. Modificación el lecho y formación de pequeñas islas. 53
Foto 20. (Izquierdo) Muro en los márgenes aguas abajo de la estructura 56
Foto 21. Mancha de tinta ubicada en la zona de efecto de lavado 56
Foto 22. Comportamiento del flujo. 57
Foto 23. Esquema de distribución de flujo y velocidades. 58
Foto 24. Avance del material transportado aguas abajo 59
Foto 25. Zonas y dunas de abanico en el embalse 59
Foto 26. Dirección y velocidad del flujo en el embalse con muro de grava 61
Foto 27. Distribución del flujo y velocidades en un embalse lleno 61
Foto 28. Socavación local frente compuertas 62
Foto 29. Influencia erosiva únicamente de las compuertas 62
Foto 30.(Izquierda) Obra para mejoramiento de lavado en el margen izquierdo... 63
Foto 31. (Izquierda). Formación de flujos horarios y antihorarios durante el embalsamiento. 66
Foto 32. Flujo preferencial con caudal 75 m^3/seg por efecto de la terraza de lavado 66
Foto 33.Velocidades embalse con un caudal de 75 m^3/seg con bocatoma abierta. 66

Foto 34. Zona de lavado y depositación de material fino sobre la terraza 67
Foto 35. (Izquierda)Dunas en abanico y zona de sedimento fino caudal de 75-90 m^3/seg. 67
Foto 36. Influencia erosiva de la compuerta de lavado con Q= 75-90 m^3/seg 68
Foto 37. Zona muerta con caudal medio por efecto obra de lavado 64
Foto 38. Velocidades embalse con un caudal de 50 m^3/seg con embalse lleno y terraza de lavado..... 65
Foto 39. (Izquierda). Efecto del flujo a la sálida de las compuertas 1 y 2 con caudal formativo. (Derecha). Formación del frente de avance de sedimentos. 65
Foto 40. Lavado material fino sobre la terraza 68
Foto 41.. Flujo preferencial con la obra de lavado..... 68
Foto 42.(Izquierda). Nueva geometría de las pilas. 69
Foto 43. Nivelación del sedimento fino y grueso en la zona de embalse 71
Foto 44. Piscina de disipación y cambio de geometría de las pilas..... 72
Foto 45. (Izquierda) Cresta de la ola y flujo con la compuerta 1 abierta 72
Foto 46.(Izquierda). Flujo e influencia erosiva compuerta de lavado. 74

DEDICATORIA:

A mi familia y amigos por todo el apoyo brindado durante toda mi carrera universitaria, por su paciencia y consejos que hicieron más llevaderos los momentos difíciles

Tatiana Alarcón

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora.

Noemí Once

AGRADECIMIENTO:

Agradecemos infinitamente a Dios por darnos paciencia y llenar nuestra alma de fortaleza en los momentos más difíciles de nuestra existencia y así poder hacer realidad este gran sueño.

La gratitud es una de las virtudes más elevadas del espíritu es por esto que queremos agradecer a nuestros compañeros de este proyecto por compartir momentos agradables y difíciles, pero esos momentos son los que nos hacen crecer; por su paciencia y dedicación.

Una mención de gratitud queremos extender a las autoridades y docentes de la Facultad de Ingeniería y de manera especial a la Ing. Verónica Carrillo, al Ing. Esteban Pacheco por su valioso aporte.

De igual manera, expresamos un agradecimiento efusivo al Ing. Felipe Cisneros, nuestro Director de Tesis, por toda su colaboración y entrega para guiarnos a la feliz culminación de este proyecto.

Tatiana Alarcón

Noemí Once

Cuenca, Octubre 2012

CAPITULO I.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES:

El río Negro está ubicado en la provincia de Morona Santiago, forma parte del sistema hídrico de Namangoza Santiago, en el se ha planificado implementar una planta hidroeléctrica que será alimentada por las aguas del cauce. El proyecto hidroeléctrico “San Bartolo” generará una potencia aproximada de 48.07 MW.

Con el propósito de ver los efectos sobre la morfología que la construcción de la obra de captación proyectada sobre el Río Negro, para el proyecto Hidroeléctrico San Bartolo, se optó por la implementación de un modelo hidráulico para la optimización del diseño de la obra, este modelo implementado para la obra de toma se considera de lecho móvil.

Para este efecto la empresa Hidrosanbartolo S.A, encargada de la construcción de la obra encarga al PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y Suelo) de la Universidad de Cuenca, la implementación de un modelo físico para el estudio de procesos hidráulicos en el cauce natural como resultado de la colocación de la obra de embalse y toma , además el estudio de forma cualitativa de procesos de erosión y sedimentación, aspectos morfológicos relevantes, que permitan para la identificación de las potenciales modificaciones para optimizar el funcionamiento de la obra.

1.2. ALCANCE:

En la presente investigación se desarrollará un estudio en Modelo Morfológico del tramo de interés del Rio Negro y la implementación de la obra de captación con el objetivo de determinar los efectos de dicha modificación sobre los procesos naturales de transporte y depositación de sedimentos.

La superficie considerada para la modelación es aproximadamente de 250X 700 m que será escalada para acoplarse a las condiciones del laboratorio. La presente investigación se enfoca en el estudio de pendientes longitudinales, caudal líquido, características del material transportado y su sedimentación. Para establecer las potenciales zonas de depositación o de erosión, flujo preferencial, velocidades de flujo etc.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL:

Establecer en forma cualitativa los procesos morfológicos que se desarrollan en el cauce como consecuencia en la colocación de la obra de captación prevista para el proyecto Hidroeléctrico San Bartolo.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Identificar las características y procesos morfológicos que se presentan en ríos de montaña.

- Estudiar en forma directa los procesos morfológicos, al identificar los problemas que se relacionan con las características del cauce.

- Identificar las zonas potencialmente críticas de erosión y sedimentación debido al comportamiento hidráulico del flujo y a los caudales de estudio.

1.4. JUSTIFICACIÓN:

La compresión y análisis de los fenómenos hidráulicos que se presentan regularmente en el mundo son tan complejos mediante modelos matemáticos incluyéndose simplificaciones que si bien representan una buena aproximación no consideran todos los parámetros o factores que intervienen. (Rocha, 1998).

Sin embargo es posible analizar dichos fenómenos de manera más integral mediante la aplicación de modelos físicos que son uno de los instrumentos más poderosos con los que se cuenta. Es por esto que la aplicación de modelos físicos para este tipo de estructuras está plenamente justificada.

La implementación de un modelo físico y el análisis de su funcionamiento en condiciones reales permitirán la identificación de los posibles problemas y con esto determinar la mejor solución que permitirá la optimización de recursos en la puesta en marcha del prototipo (obra a escala real)

CAPITULO II.

2. MARCO TEORICO

2.1. CARACTERISTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS MORFOLOGICOS

Los cambios morfológicos en los ríos pueden deberse a causas naturales o antrópicas. Las intervenciones humanas sobre un sistema hidráulico pueden desencadenar procesos a altas velocidades que naturalmente tardarían mucho tiempo en producirse y en algunos casos pueden llegar a ser irreversibles. (Universidad de Cauca, Procesos Fluviales, 2003)

Causas Naturales:

- Migración lateral y longitudinal del cauce
- Corte de meandros
- Erosión de orillas
- Formaciones de lecho como barras e islas

Causas Antrópicas:

- Construcción de obras hidráulicas como presas, diques, espolones, puentes, corte artificial de meandros, revestimientos del cauce.

- Actividades de minería en la cuenca pueden generar la producción de sedimentos que al ser conducidos al cauce aumentan las posibilidades de sedimentación.

- Cambios en el uso del suelo; por ejemplo zonas agrícolas pasan a ser urbanas.

Son tres los procesos relevantes desde el punto de vista de la dinámica fluvial los encargados de la formación de los ríos:

1. Erosión o degradación de los materiales rocosos.
2. Transporte de sedimentos
3. Sedimentación o agradación de los sedimentos.

2.1.1. EROSIÓN

La degradación o erosión de un cauce se refiere a la pérdida de material en una zona del río y es el producto del desequilibrio entre el aporte sólido que trae el agua a una cierta sección y la mayor cantidad de material que es removido por el agua de esa sección.

La erosión y el desgaste son probablemente el resultado de la acción de fuerzas y esfuerzos que se aplican sobre la superficie de la tierra. Todos los procesos de erosión son conducidos por gravedad, así como la corriente-flujo, descenso cuesta abajo, etc.

2.1.1.1. FENOMENO DE LA EROSIÓN

A continuación se explican brevemente algunos tipos de erosión que afectan principalmente las obras de ingeniería (Universidad del Cauca, Procesos Fluviales, 2003):

a. REMOCIÓN DE MASAS

Estos fenómenos comprenden una gran variedad y complejidad de movimientos ladera abajo de material geológico debidos a la fuerza de la gravedad, incluyen la pérdida de materiales por deslizamiento de taludes y por erosión de laderas.

b. SOCAVACIÓN A LARGO PLAZO

Se refiere a la tendencia a la erosión que el lecho presenta a lo largo del tiempo debido a causas externas, ya sean naturales o inducidas por el hombre, pero sin tenerse en cuenta eventos extremos o crecientes. La socavación a largo plazo se considera de tipo permanente. Se manifiesta en grandes extensiones a lo largo del cauce.

c. SOCAVACIÓN GENERAL

La socavación general es el descenso generalizado del fondo del río como consecuencia de una mayor capacidad de la corriente para arrastrar y transportar sedimentos del lecho durante crecientes. Se considera de carácter transitorio o cíclico al ocurrir durante crecientes.

El descenso del lecho puede ser uniforme o no uniforme a través de la sección transversal. Se debe principalmente a la contracción del flujo ya sea en sentido vertical u horizontal, es decir una disminución de su ancho, lo que ocasiona la remoción de material a través de todo o casi todo el ancho del cauce, ocasionada ya sea por causas naturales o artificiales o por el cambio en el control aguas abajo de la elevación de la superficie del agua.

d. *SOCAVACIÓN LOCAL*

La socavación local se refiere a la remoción del material que circunda pilas y estribos de un puente o estructura que interrumpa el paso natural del agua (presas, obras de captación), también se presenta aguas abajo de presas vertedoras y alcantarillas; se asocia a la presencia de obstáculos que producen un cambio en la dirección de las líneas de corriente, lo cual provoca una gran turbulencia, aceleración del flujo y vórtices que resultan del choque contra estos elementos. Aproximadamente la socavación máxima en las pilas es de 2,4 veces el ancho de la pila, para el caso de pilas circulares. (Melville y Chang)

La longitud, ancho y forma de la pila inciden directamente con la formación de vórtices superficies (por sobreelevación de agua en la cara aguas arriba de la pila) y vórtices de “herradura” en la base que actúan en el lecho tanto en la parte frontal como lateral de la pila responsables de la erosión local, se puede ver en la *Fig. 2.1:*

- *Longitud pila*: se relaciona con el ángulo de ataque, si no hay ángulo no afecta la profundidad de socavación.

- *Ancho de la pila:* al aumentar el ancho hay una mayor área de ataque del flujo y la profundidad de socavación aumenta.

- *Forma de pila:* mientras más alineada este el frente este con la corriente, los vórtices laterales y remolinos se reducen reduciendo la profundidad de socavación.

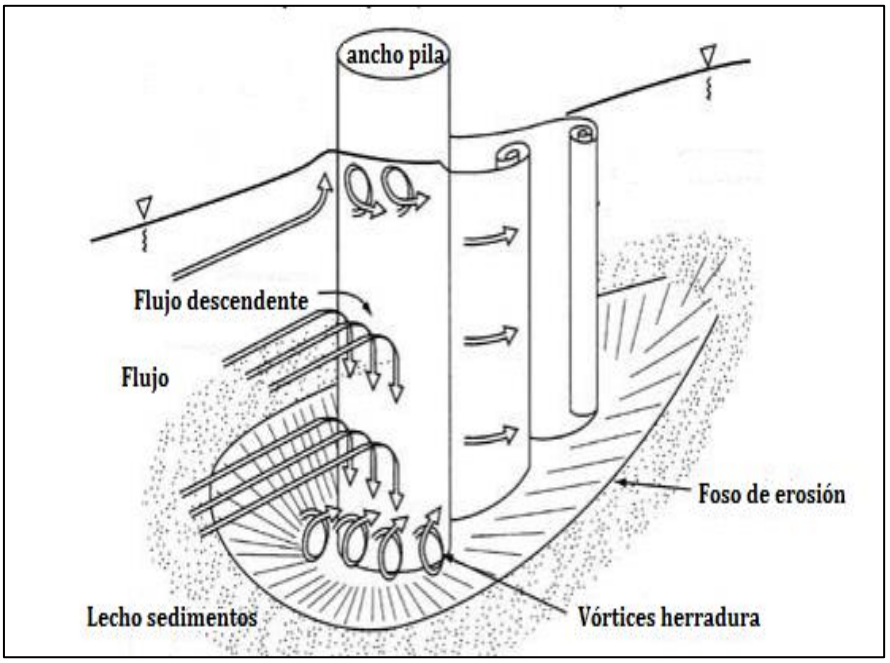


Fig 2.1. Características del flujo alrededor de la pila (GITS, 2001)

2.1.1.2. ORIGEN DE LA EROSIÓN EN LOS CAUCES FLUVIALES

a. AUMENTO DEL CAUDAL

Un aumento en el caudal produce a su vez un aumento de la velocidad media, la fuerza tractiva y la capacidad de transporte, lo cual a su vez provoca una erosión generalizada, o una socavación en determinados puntos.

b. INTERRUPCIÓN DEL TRANSPORTE SÓLIDO

El río tiene una tendencia a un estado de equilibrio, si por alguna razón se pierde o interrumpe el suministro sólido, el río conserva su capacidad de transporte, sin embargo tiene menos sólidos provocando una erosión generalizada y una profundización del cauce.

Erosión aguas abajo de una obra o presa

Existe un desequilibrio sedimentológico entre la sección aguas arriba y aguas abajo de la construcción de un presa, en el tramo aguas arriba existe sedimentación y el tramo aguas abajo se produce erosión, que provoca una profundización del lecho que puede alcanzar varios metros, una reducción de la pendiente longitudinal. La obra interrumpe el gasto sólido ocasionando que el cauce aguas abajo arrastre el propio material de su lecho, provocando un cambio en su pendiente.

c. ESTRECHAMIENTO DEL CAUCE

Cuando se disminuye el ancho de un tramo fluvial, la corriente converge; esto determina una disminución de la sección transversal, aumenta la velocidad y la capacidad de transporte, dando lugar a una profundización del cauce.

d. CONFLUENCIA FLUVIAL

En la sección aguas abajo de un río, se tiene una afluente más o menos libre esto provoca erosión.

e. OTROS

Existen ejemplos de tendencia a la erosión, como por ejemplo: a la salida de un disipador debido al resalto hidráulico, o cuando se produce el corte de un meandro. (Rocha, 1998)

2.1.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Es el acarreo de materiales provenientes de rocas y suelos que el agua corriente incorpora al flujo o arrastra a su paso. Este proceso es complejo ya que el sedimento viene en tamaños muy diversos, desde partículas invisibles que se confunden con el agua, hasta grandes clastos que un río solo puede mover algunos centímetros en crecidas.

2.1.2.1. EQUILIBRIO DE UN RIO

Un río esta en equilibrio cuando la cantidad de sólidos que ingresa es igual a la que sale, en un tiempo determinado, es decir en dicho tramo no existe erosión ni sedimentación, de manera que el fondo no modifica su cota. Si en el tramo la cantidad de sólidos que ingresa es mayor que la que sale, esto significa que en dicho tramo hay sedimentación; de otra manera si la cantidad de sólidos que ingresa es menor que la que sale se dice que hay erosión. (Martin Vide, 2003)

2.1.2.2. FORMAS DEL LECHO

El lecho se caracteriza por formaciones que varían de tamaño, disposición y localización con los cambios de flujo, temperatura y carga de sedimentos, tamaño característico del material del lecho, tales cambios resultan de la interacción entre el flujo, el fluido y el material del lecho; influyendo en parámetros como la profundidad, velocidad, rugosidad, transporte de sedimento. (Martin Vide, 2003)

Los continuos procesos de erosión y sedimentación dan lugar a diferentes formas de lecho, en función del tipo de régimen de los caudales (subcritico, transición, supercritico) se formas las denominadas rizaduras, dunas, lecho plano, antidunas, rápidos y pozos (Galiano y Toapaxi, “Análisis de la socavación en cauces naturales”, 2010).*Ver Fig 2.2*

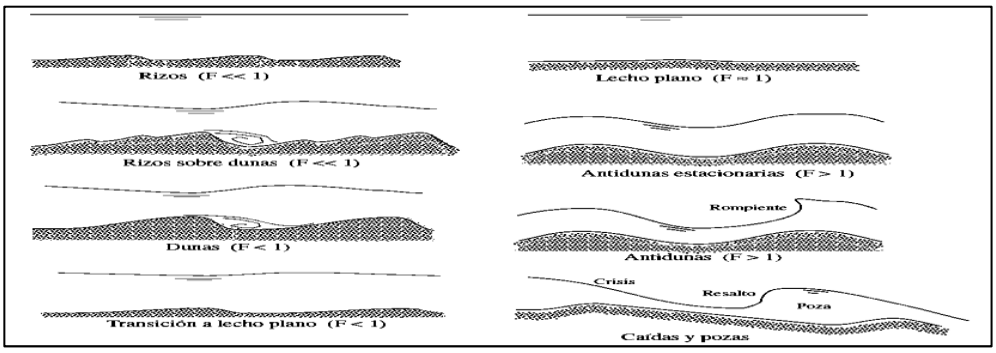


Fig 2.2. Rizos, dunas, lecho plano, antidunas, rápidos y pozos (Galiano y Toapaxi, 2010)

Los ***rizos y las dunas*** son característicos de régimen lento donde el flujo es subcritico (Fr<1), el esfuerzo cortante y la velocidad son bajos, además la superficie libre se ondula suavemente en oposición al fondo. Los rizos (de ordinario, con alturas de 0.1 m) se encuentran asociados con la presencia de una capa laminar, y su tamaño depende de la profundidad del flujo; su presencia indica que el movimiento no es turbulento rugoso en el fondo; las dunas se encuentran asociadas con una capa limite turbulenta y su tamaño es proporcional al calado del agua, son muy suaves aguas arriba y muy marcadas aguas abajo se mueven hacia aguas abajo, conforme se aumenta el caudal se eleva la velocidad lo cual provoca que las dunas tiendan a ser barridas o eliminadas.

Las ***ondas estacionarias*** son características de condiciones cercanas al régimen de transición (Fr=0.1), es decir, el flujo es próximo a la condición crítica.

La transición entre la formas de lecho de dunas y ondas estacionarias ocurre en el ***lecho plano,*** que tiene un patrón de lecho inestable, es con frecuencia observado en números cercanos a la unidad, ejemplo Fr=0.83 (Laursen, 1958). Conforme se aumenta la velocidad el lecho plano se ondula formando las ***antidunas*** que se observan en flujo supercritico (Fr>1) y pueden migrar en dirección aguas abajo y aguas arriba a pesar de verificarse un fuerte transporte de sedimentos aguas abajo, la superficie libre presenta una fuerte ondulación en correspondencia con el fondo lo cual indica que el régimen hidráulico es rápido donde el esfuerzo cortante y la velocidad son altos. (Chanson, 2004)

A altas velocidades de flujo (corrientes montañosas o en torrentes) el fondo se transforma rápidamente en una sucesión de pendientes suaves y largas **(rápidos)** donde el agua pasa de un régimen lento a uno rápido, además de contrapendientes que se cierran en **cuencos o pozos** donde se produce el resalto. (Martin Vide, 2003)

2.1.2.3. DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE

La dirección de la velocidad de un río no es paralela a las orillas (Leliavsky 1894), sino que presenta desviaciones, la velocidad no es uniforme a través de una sección, en las partes más hondas la velocidad es mayor. (Martin Vide, 2003)

FLUJO EN CURVAS

Se presenta especialmente en curvas unidas por tramos rectos que dan origen a meandros, caracterizados por la capacidad de arrastre de sólidos, mayor en el margen externo donde origina erosión, que en la parte interna donde existe depositación de sedimentos (Universidad del Cauca, Morfología Fluvial, 2003). *Como se observa en Fig. 2.3.*

- El flujo que converge hacia la curva (entra) concentra el caudal (aumento del caudal unitario por reducción de anchura), provocando erosión de fondo.
- El flujo divergente desde la curva (sale) amplia el caudal (disminuye el caudal unitario por aumento de anchura), provocando sedimentación de fondo.

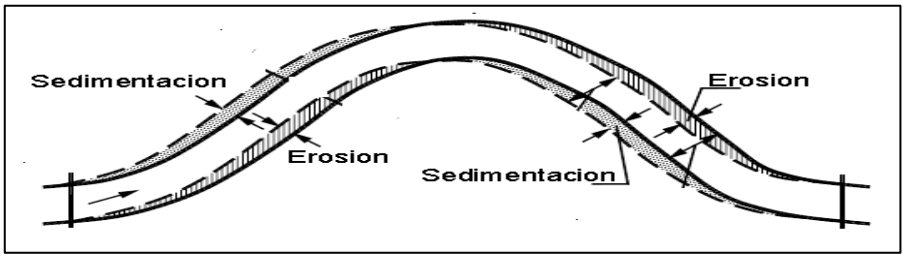


Fig 2.3.Zonas de erosión y depositación dentro de la curva (Universidad del Cauca, Morfología Fluvial, 2003)

"El llamado "efecto curva", se aprovecha para lograr las mejores condiciones de ubicación de una obra, esta no debe ir la parte interior donde existe tendencia a la sedimentación, sino en el margen exterior donde la erosión pude ser controlada." (Rocha, 1998).

La dirección de un flujo puede verse mediante la trayectoria de una partícula, si la curva esta hacia la derecha el sentido del flujo es anti horario mientras que si la curva es hacia la izquierda el flujo es horario.

2.1.2.4. PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUCE DEL RIO

El perfil longitudinal de un río, describe la forma en el que éste varía su cota a lo largo de su longitud y recorrido; de tal modo que el perfil reflejará la pendiente de cada tramo, determinada por las condiciones impuestas en el tramo aguas arriba. (Universidad del Cauca,

En general los perfiles longitudinales de los ríos presentan forma cóncava con una pendiente que va disminuyendo desde zonas con mayor erosión hasta zonas bajas con mayor sedimentación.

La pendiente varía con el gasto y con las características fisiográficas, se asocia con el aumento del gasto, la pendiente disminuirá al aumentar el caudal del río. En general en las partes altas están las mayores pendientes, y por lo tanto se encontraran las mayores velocidades y el material transportado estará constituido por partículas gruesas, mientras que en las partes bajas de los cauces, la pendiente disminuye notablemente al igual que su velocidad y diámetro característico del material sólido. (Universidad del Cauca, Morfología Fluvial, 2003)

Existe una correlación entre pendientes, velocidades y tamaño característico de los sólidos. *Ver Fig 2.4.*

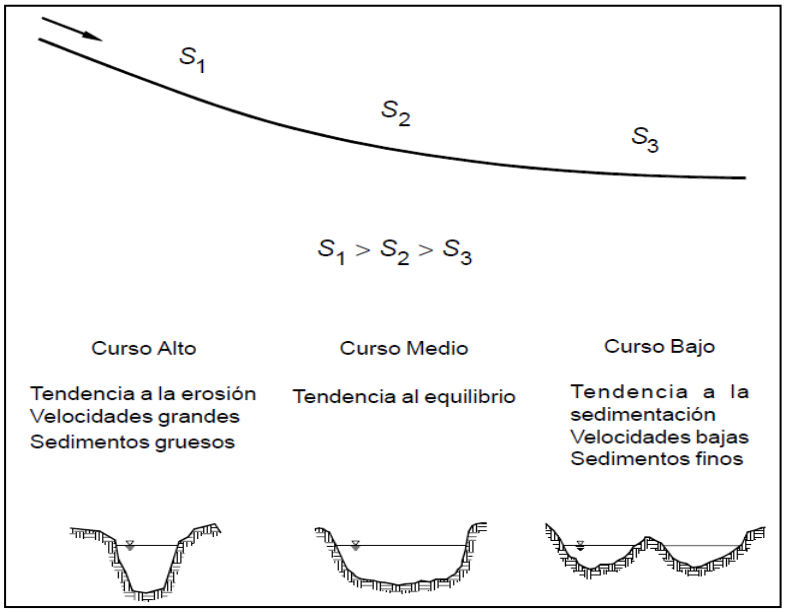


Fig 2.4. Perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un rio a lo largo de su recorrido. (Rocha, 1998)

2.1.3. SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es el proceso que se presenta si el nivel del lecho del río se eleva o si las márgenes se desplazan hacia el interior del cauce y ocurre cuando hay exceso de sedimentos que la corriente no puede arrastrar. Es decir el flujo pierde potencia y va dejando caer los materiales que acarrea, primero los más grandes y luego los más pequeños. (Universidad del Cauca, Procesos Fluviales, 2003)

Este problema se presenta especialmente en las corrientes que llegan con gran cantidad de material sólido proveniente de la degradación en la zona de montaña, que al llegar a zonas de bajas pendientes no pueden ser transportados quedando depositados. El principal problema que causa la sedimentación es la disminución de la sección hidráulica y de la capacidad de transporte de caudal en una corriente.

En la literatura especializada es frecuente encontrar la expresión ***"transporte de sedimentos",*** en un sentido amplio que incluye, las fases de erosión, transporte y sedimentación. Estos procesos operan íntimamente ligados, cuando los caudales crecen, tanto la masa como la velocidad del agua aumentan lo cual mejora su capacidad para desgastar las superficies (erosión) y para recoger materiales (transporte), posteriormente el caudal disminuye dejando caer los sedimentos (sedimentación).

2.1.3.1. ORIGEN DE LA SEDIMENTACIÓN

ENSANCHAMIENTO DEL CAUCE

Al aumentar el ancho de un tramo fluvial, la corriente diverge; esto provoca un aumento la sección transversal, disminuye la velocidad y la capacidad de transporte, dando lugar a la depositación de sedimentos. (Rocha, 1998)

2.1.3.2. SEDIMENTACIÓN EN EMBALSES

Un embalse construido sobre el lecho del río es una trampa de sedimentos, una parte de los sólidos transportados por la corriente queda retenida en el embalse lo cual disminuye la capacidad de almacenamiento. (Gracia y Maza, 1997). La sedimentación aguas arriba del embalse se da por la elevación de los calados del río, y un aumento de la sección transversal lo cual disminuye la velocidad favoreciendo la depositación. El término azolvamiento se usa para describir este fenómeno. (Rocha, 19998)

En la Fig 2.5 se muestra la tendencia de sedimentación aguas arriba de un embalse.

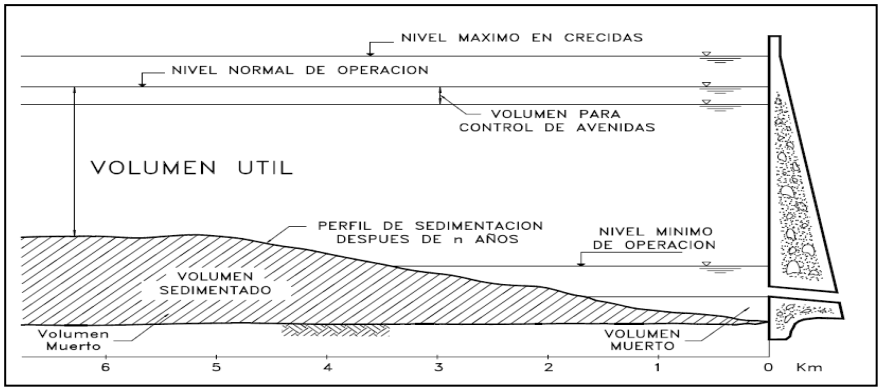


Fig 2.5.Sedimentación esperada en un embalse. (Rocha, 1998)

Donde:

- *Volumen muerto:* Es el volumen que se ubica por abajo de la cota de descarga más baja del embalse.

- *Volumen útil:* Es el volumen del reservorio que está disponible para generación de energía u otro propósito.

- *Volumen para control de avenidas o crecidas (fenómeno extraordinario que transporta la mayor cantidad de sólidos, provocando desbordamientos o inundaciones):* es la parte del volumen útil específicamente para este fin.

La cantidad de sólidos depositados puede ser analizada por el régimen de operación del embalse:

- En un evento de crecida con un nivel de cota baja en el embalse la curva de remanso es corta y los sedimentos se depositan cerca de la presa.

- Con cota alta en el embalse durante una avenida, la curva de remanso se extiende varios metros aguas arriba, los sedimentos se quedarán muy lejos de la presa.

El *transporte* y la *acumulación de sedimentos* durante una crecida dependen de la duración de ésta y de la calidad y cantidad de sedimentos disponibles.

2.1.3.3. ABANICO ALUVIAL

Los abanicos aluviales en un rio ocurre cuando hay un cambio de pendiente, de fuerte a suave que ocasiona que el río de lugar a varios cauces. Son formados cuando una corriente de agua que fluye rápidamente entra en una zona más tendida, la velocidad disminuye, extendiendo su cauce en abanico. (Gracia y Maza, 1997)

Al perder velocidad la corriente disminuye su capacidad de transporte, depositando su mayor carga en la parte más cercana al cambio brusco de pendiente donde se depositan los sedimentos más gruesos, para luego desplazarse pendiente abajo donde va perdiendo paulatinamente el resto de la carga donde la sedimentación es más fina.

2.2. HIDROLOGIA FLUVIAL

La *hidrología fluvial* es el estudio de la secuencia en que presentan los caudales de un río y las variaciones de caudal definen el *régimen hidrológico* de un río, están variaciones temporales se dan durante o después de las tormentas. En casos extremos se puede producir una crecida cuando el aporte de agua supere la capacidad del río para evacuarla, desbordándose y cubriendo zonas llanas próximas. (Martin Vide, 2003)

El estudio de los niveles de los caudales se lleva a cabo midiendo la cantidad de agua (m^3), que pasa por una estación de monitoreo en un tiempo determinado, el resultado de estos estudios se expresa en gráficamente en los denominados "*hidrogramas",* en los que se representan la distribución periódica del caudal que fluye en los ríos analizados. *Ver Fig 2.6.*

La importancia de los estudios de los caudales radica en que gracias a datos aportados por ellos se puede obtener información sobre el comportamiento anual de los ríos y con ello planificar trabajos de acuerdo a la cantidad de agua disponible en un territorio en un periodo de tiempo. De la misma manera los hidrogramas posibilitan prevenir y aprovechar situaciones como: periodos de avenida (crecida) o sequias prolongadas.

El hidrograma de avenida (crecida) es importante en el estudio del rio, debido a que la duración de los caudales elevados cercanos al máximo que influyen en la acción del agua sobre el cauce, los fenómenos de erosión transitorios del cauce se relación con la forma del hidrograma y otros fenómenos de erosión son acumulativos por lo que están influidos por la duración. (Martin Vide, 2003)

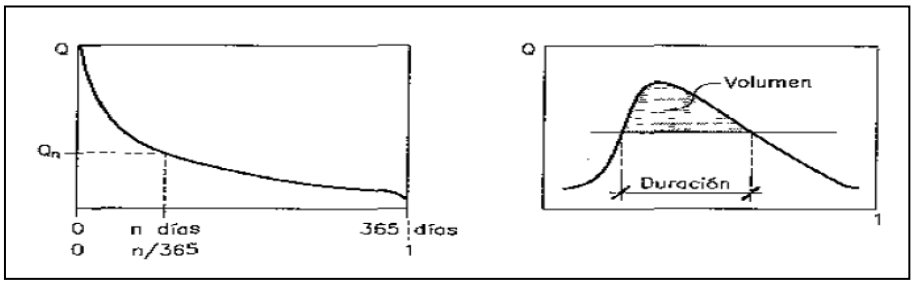


Fig 2.6. Curva de caudales clasificados y características de un hidrograma (Martin Vide, 2003)

2.2.1. CAUDAL DOMINANTE

"Se puede definir al caudal dominante a aquel que fluyendo como caudal constante todo el año transportaría el mismo volumen de sedimentos de fondo total."(CEDEX, 2000). Es el caudal que llena el cauce hasta sus orillas.

Es decir que el caudal dominante llamado también "formativo o medio", es aquel que se da 2 veces al año como promedio o bien, según otros autores, un caudal con un periodo de retorno de 1,4 años. (Martin Vide, 2003).

El caudal dominante determina ciertos paramentaros del cauce como la longitud de curvatura de meandros o el caudal que efectúa mayor trabajo en términos de transporte de sedimentos, este realiza la mayor acción modeladora (en términos de velocidad o tensión tangencial).

2.3. MODELOS HIDRÁULICOS

2.3.1. GENERALIDALES

Entre los problemas importantes que se presenta en los proyectos en ingeniería fluvial es la predicción del comportamiento de un rio de modo de lograr el diseño más eficiente de las estructuras hidráulicas. La eficiencia implica que la estructura cumpla su función con la máxima seguridad y el menor costo posible.

Una de las formas de conocer mejor el comportamiento fluvial es estudiándolo en un modelo físico que es una representación a escala de una situación hidráulica de flujo, el estudio del modelo permite la obtención de un diseño más seguro así como eficiente y económico. La condición que debe cumplir el modelo es la reproducción adecuada de las condiciones naturales.

En el estudio un modelo físico se debe tomar en cuenta los fenómenos en situaciones de flujos hidráulicos como los efectos viscosos, tensión superficial y gravitacional. El uso del mismo tipo de fluido tanto en el modelo como en el prototipo prohíbe satisfacer simultáneamente los criterios de escalonamiento de los números de Froude, de Reynolds y Weber.

Debido a que el modelo físico se comporta como un flujo en superficie libre (un canal abierto), los efectos gravitacionales siempre son importantes y se utiliza una modelación de número de Froude (Fr) (Chanson, 2004) es decir:

$$Fr_{MODELO} = Fr_{PROTOTIPO} \qquad (2.1)$$

Este tipo de modelo debe satisfacer las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, dentro del análisis de la modelación hidráulica no de la teoría básica de la mecánica de fluidos.

2.3.2. MODELO NO DISTORSIONADO

Se puede decir que el modelo no distorsionado es aquel en donde se aplica la misma escala longitudinal, es decir, si el modelo es una réplica del prototipo por reducción de todas las dimensiones verticales y horizontales, a la misma escala en otros términos.

2.3.3. LECHO MOVIL

Los modelos de lecho móvil son aquellos en los que al encontrarse el fluido en movimiento altera y modifica la frontera por lo que son utilizados en el estudio de procesos fluviales donde exista transporte de sedimentos y se desee conocer la erosión y sedimentación producidas ya sean en forma natural o por la construcción de obras hidráulicas. (Rocha, 1998)

La condición fundamental que debe cumplir un modelo de lecho móvil es la reproducción correctamente la configuración general del fondo y las cantidades de material solido arrastrado por la corriente fluvial. En un modelo de lecho móvil las condiciones de similitud se han de obtener a partir de las leyes que describen el transporte sólido.

a. SIMILITUD GEOMÉTRICA

La similitud geométrica implica que las relaciones de las longitudes características del prototipo con respecto a las longitudes del modelo son iguales (Chanson, 2004). La similitud geométrica implica, de un modo estricto que sea igual la relación de todas las longitudes en los dos sistemas, designándose con *p* al prototipo y *m* al modelo, la similitud geométrica implica que:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} = \frac{d_p}{d_m} = \frac{H_p}{H_m} \quad Longitud \quad \text{ó} \quad \lambda l = \frac{L_p}{L_m} \qquad (2.2)$$

Donde L_r es la escala de líneas que cuantifica el tamaño relativo de los dos sistemas.
Una consecuencia de la similitud geométrica exacta es que la relación de áreas y volúmenes en ambos sistemas se puede expresar en términos del cuadrado y del cubo de L_r esto es:

$$\frac{A_p}{A_m} = L_r^2 \qquad Area \qquad (2.3)$$

$$\frac{v_p}{vm} = L_r^3 \qquad Volumen \qquad (2.4)$$

Donde:
Ap, Am Son respectivamente el área del prototipo y modelo
v_p , v_m Son respectivamente el Volumen del prototipo y modelo

b. SIMILITUD CINEMÁTICA

“Se refiere a la correspondencia que debe de existir del movimiento del fluido en el modelo y en el prototipo”. (Pizarro y Murillo, 1992).

La similitud cinemática implica la similitud de movimientos. Así entre un modelo y la naturaleza existiría similitud cinemática si las partículas homologas en movimiento son geométricamente semejantes y si las razones de los eventos homológalos (que depende del tiempo) de esas partículas son iguales (Niño y Duarte, 2004).

Dentro del modelo y del prototipo existe semejanza cinemática si:

a) La trayectoria de las partículas móviles homologas son geométricamente semejantes.
b) Las relaciones entre las velocidades de las partículas homologas son iguales. A continuación se dan las siguientes relaciones útiles:

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} \qquad a_r = \frac{a_m}{a_p} \qquad Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} \qquad (2.5)$$

Donde
$V_m,\ a_m,\ Q_m,$ Son respectivamente, la velocidad, la aceleración y el caudal en el modelo.
$V_p,\ a_p,\ Q_p,$ Son respectivamente, la velocidad, la aceleración y el caudal del prototipo.
$V_r,\ a_r,\ Q_r,$ Son respectivamente escala de velocidades, aceleraciones y caudal.

c. SIMILITUD DINÁMICA

Existirá similitud dinámica si las fuerzas que actúan en el prototipo se reproducen exactamente en puntos homólogos en el modelo. Las fuerzas se manifiestan en los fenómenos hidráulicos del flujo en superficie libre son las fuerzas de inercia, gravedad, viscosidad y presión y se debe tener cuidado de reducir el efecto de las fuerzas de tensión superficial. (Niño y Duarte, 20004)
Las condiciones requeridas para la similitud dinámica se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton

$$\sum F_x = M * a_x \qquad (2.6)$$

La identificación de fuerzas que condicionan el fenómeno hidráulico en el prototipo y representarlas en el modelo mediante parámetros adimensionales pueden ser simbolizadas por el numero de Froude (Fr), Reynolds (Re), Weber (W).

Cuando un modelo satisface la similitud dinámica automáticamente se asegura el cumplimiento de la similitud cinemática. Para que exista una similitud dinámica exacta el número de Froude y Reynolds deben ser exactamente iguales tanto en el modelo como en el prototipo (Chanson, 2004).

El número de Froude es el cociente de las fuerzas inerciales entre las fuerzas gravitacionales es decir:

$$Fr = \frac{Velocidad}{\sqrt{g\ L}} \qquad (2.7)$$

Tomando de la ecuación (2.7) y remplazando en la ecuación (2.1) tenemos:

$$\frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}} = \frac{V_P}{\sqrt{g_P L_P}} \quad \rightarrow \ g_m = g_p \ \Rightarrow \frac{g_m}{g_P} = 1 \qquad (2.8)$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{L_m}} = \frac{V_P}{\sqrt{L_P}} \qquad (2.9)$$

Simplificando tenemos:

$$\frac{V_m}{V_P} = \sqrt{\frac{Lm}{Lp}} \qquad (2.10)$$

Remplazando la ecuación (2.1) en la ecuación (2.10) tenemos:

$$\frac{V_m}{V_P} = \sqrt{\lambda l} \qquad (2.11)$$

El modelo no es distorsionado en la escala horizontal y vertical, dándonos relación de escalas para los siguientes parámetros:

$$\lambda l = \lambda l \qquad Longitud \qquad (2.12)$$
$$\lambda a = \lambda l^{\,2} \qquad Area \qquad (2.13)$$
$$\lambda v = \lambda l^3 \qquad Volumen \qquad (2.14)$$

$$\lambda q = \lambda l^2 * \sqrt{\lambda l} \quad \Longrightarrow \quad \lambda q = \lambda l^{5/2} \qquad Caudal \qquad (2.15)$$

$$\frac{\boldsymbol{Qm}}{\boldsymbol{Qp}} = \boldsymbol{\lambda l^{5/2}} \qquad (2.16)$$

λv: Escala de velocidades
λl : Escala Longitudinal
λa: Escala de áreas
λq: Escala de caudales

Es decir que en el fenómeno hidráulico donde debe de satisfacer la ley de similitud dinámica de Froude, la escala de caudales es igual a la escala de longitudes a la potencia 2.5; deberá tenerse cuidado en la dirección del flujo para usar la escala apropiada.

En la siguiente tabla 2.1.se presenta un breve resumen de los factores de escala:

Parámetro	**Factores de escala**
Longitud	$\lambda = \frac{L_m}{L_p}$
Superficie	$\lambda^2 = \frac{A_m}{A_p}$
Volumen	$\lambda^3 = \frac{A_m}{A_p}$
Tiempo	$\lambda^{1/2} = \frac{t_m}{t_p}$
Caudal	$\lambda^{5/2} = \frac{Q_m}{Q_p}$
Velocidad	$\lambda^{1/2} = \frac{V_m}{V_p}$

Tabla 2.1. Factores de escala

CAPITULO III.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SAN BARTOLO

El proyecto “Hidro San Bartolo” S.A. comprende una central de generación hidroeléctrica de pasada con una potencia de generación aproximada de 48.07 megavatios (MW), y que generará alrededor de 350 giga vatios (GW) por año, con un factor de planta del 83,25%. Los principales elementos del proyecto comprenden una presa de derivación de poca altura, la estructura de captación de agua, tuberías de acero, tubería de presión, una central eléctrica de superficie, una línea de transmisión y una subestación eléctrica. La longitud del proyecto es de 5.500 metros para mantener una cabeza neta de 183 metros.

Obra de Toma: La captación es del tipo convencional y captará un caudal de 30 m^3/seg. Cuenta con un azud con un ancho de 19,5m y una altura de 12,8m, tres compuertas que serán utilizadas en eventos de crecida para la evacuación de caudal con una abertura de 7 m y un ancho de 6m, una compuerta de lavado de 4 m de ancho que está conectada a un canal para el desalojo de sedimentos con una pendiente del 4 % y una longitud total de 80 m que desemboca aguas abajo de la obra. *Ver Fig 3.1*

Obra de conducción: la conducción está formada por un tramo inicial constituido por un canal embaulado de 800m de longitud continuando con un tramo formado de una tubería circular hasta alcanzar la casa de máquinas. *Ver Fig 3.1*

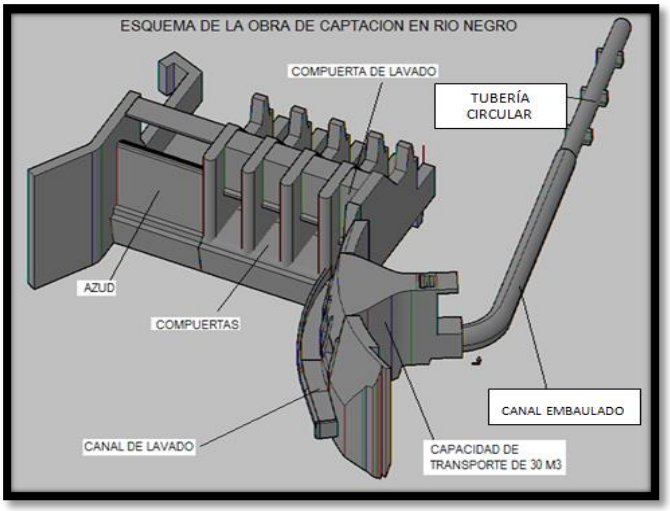


Fig 3.1. Esquema de la obra de captación y conducción para el proyecto hidroeléctrico “San Bartolo”

Cuenca hidrográfica del Rio Negro

A la cuenca hidrográfica del Río Paute, le pertenecen la “subcuenca baja del Río Paute” y la “subcuenca del Río Negro”. La “subcuenca del Río Negro está localizado en la parte oriental del Río Paute y su extensión es de 80224 ha se puede ver en la Figura 3.2.

La cuenca hidrográfica del Río Paute se extiende desde la divisoria de aguas entre el Pacifico y el Atlántico, localizado en el sector de Tres Cruces en la porción occidental hasta la confluencia del Río Paute con el Río Negro próximo a la ciudad de Méndez en la provincia de Morona Santiago. A esta unidad hidrográfica pertenecen la “subcuenca baja del Río Paute” y la “subcuenca del Río Negro”.

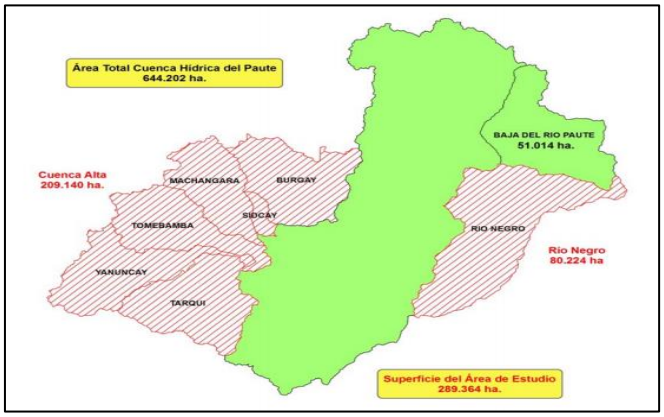


Fig 3.2. Ubicación de la cuenca del rio Negro.

UBICACIÓN DEL PROYECTO DE OBRA DE CAPTACIÓN

El proyecto está ubicado en la provincia de Morona Santiago, en la zona poblada de San Bartolo, teniendo como centros poblados próximos a Copal, San Bartolo, La delicia, La dolorosa entre otros. Las coordenadas del proyecto son 787741 – 9696202 (UTM WGS84 ZONA 17 S) se podrán ser ubicada en la figura 3.3. Así como su perfil y ubicación del proyecto.

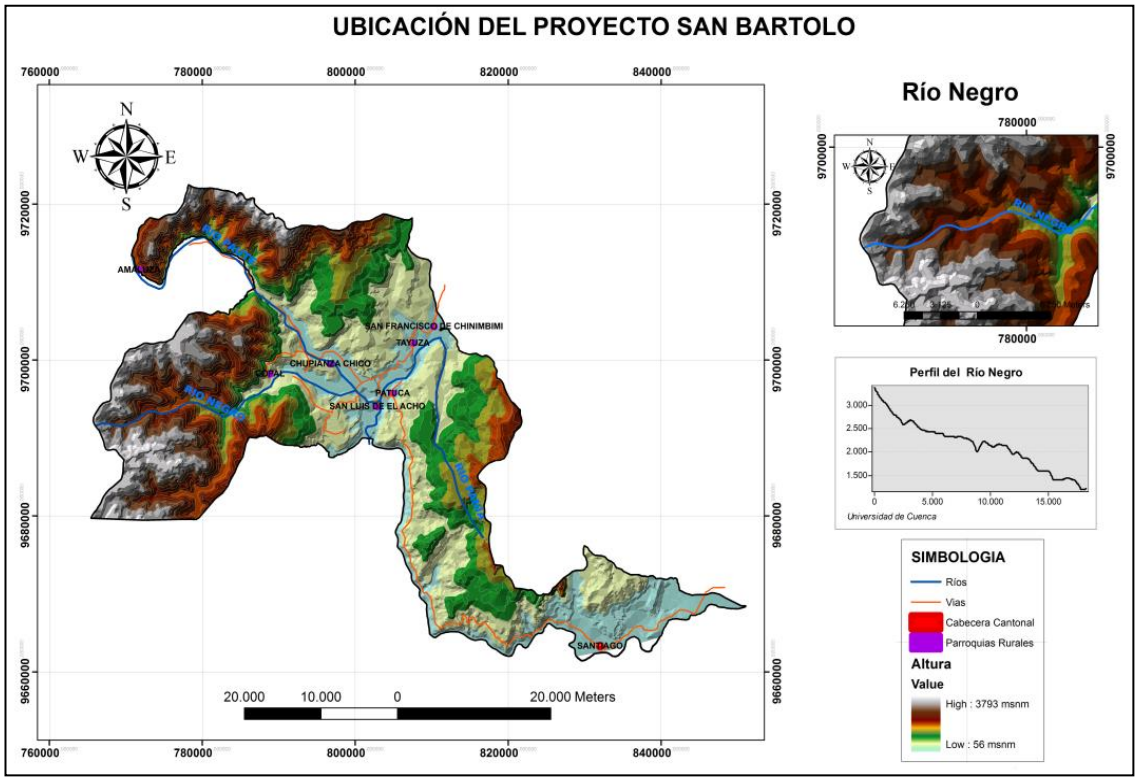


Fig 3.3. Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo”

3.2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MODELO MORFOLOGICO DEL RÍO NEGRO.

3.2.1. CONSIDERACIONES DE ORDEN HIDROLÓGICO PARA EL MODELO

Con respecto a procesos y fenómenos vinculados al flujo dinámico de un rio como son la erosión, la sedimentación y el transporte se debe tomar en consideración el régimen hidrológico regular y acontecimientos extremos.

Tomando en cuenta que el cauce en análisis corresponde a un rio en dinámica de procesos erosivos y de transporte, se ha asociado estos fenómenos y los procesos de flujo a la hidrología de los eventos de regularidad hidrológica, y a la hidrología de eventos extremos como base para el análisis de los fenómenos asociados al transporte de carga de lecho en situaciones extremas.

3.2.1.1. HIDROLOGÍA DE CAUDALES CLASIFICADOS

Analizando los estudios hidrológicos realizados para el proyecto Hidroeléctrico San Bartolo, *ver Tabla 3.1.* Se concluye que la distribución de los valores medios mensuales para la zona obedece al comportamiento de régimen amazónico con caudales mayores hacia la mitad del año, lo cual permite establecer como caudal formativo del cauce el valor 50 m^3/s para efectos del estudio sobre el modelo físico. (Ver Informe Hidrológico del proyecto Hidroeléctrico San Bartolo)

Año	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Mínimo	19,8	19,2	21,0	22,5	27,7	31,9	47,0	21,2	25,1	22,0	19,5	19,1	35,4
Medio	29,4	37,2	45,7	60,4	64,6	73,1	76,6	59,7	48,0	41,2	34,7	31,2	49,3
Máximo	52,5	74,1	85,5	112,6	105,4	116,8	103,3	92,0	85,6	71,9	61,4	57,5	65,3

Tabla 3.1. Caudales medios mensuales en los sitios de toma del aprovechamiento Copal- San Bartolo.

Fuente: Informe Hidrológico del proyecto Hidroeléctrico San Bartolo.

3.2.1.2. HIDROGRAMA DE DISEÑO

Para el estudio del modelo se consideró el hidrograma del Río Negro para un periodo de retorno de 100 años que indica en la *Fig 3.4.*

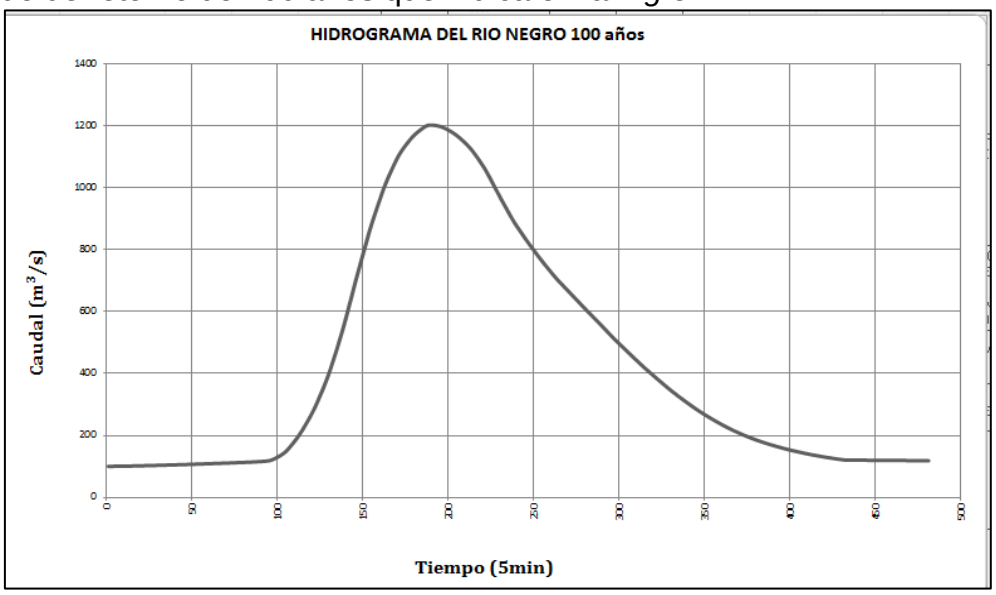


Fig 3.4. Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Informe Hidrológico del proyecto Hidroeléctrico San Bartolo.

3.2.2. CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DEL CAUCE.

Se realizó un análisis de las condiciones de orden morfológico que presenta la zona de estudio. El tramo donde se emplazo la obra, se tiene una zona de transición entre pendientes desde el 8 % (macroescala) hasta zonas de pendiente de 5% (microescala), se considero necesario estudiar un tramo aguas arriba del lugar de emplazamiento de la obra de 6km. (Ver, Informe de la primera fase del Estudio en modelo Hidráulico para la obra de captación en el Río Negro del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo, elaborado por el PROMAS-U Cuenca 2012).

En el cauce natural del río se puede observo lo siguiente:

- A medida que se avanza aguas abajo del lugar de emplazamiento de la obra, disminuye la pendiente, identificándose zonas de pendiente muy baja.

- En el tramo aguas abajo de la zona de emplazamiento de la obra se establece una amplia zona cóncava en el margen derecho del cauce. *Ver foto 1*

Foto 1. Amplia zona cóncava aguas abajo del lugar de emplazamiento

- En el sector aguas abajo, se identifico un escalón natural que atraviesa en forma transversal el cauce

- El cauce presenta profundización del lecho en lugar de llanuras de inundación, lo cual puede ser un factor que se suma a la inestabilidad de taludes y deslizamientos observados.

- En el margen derecho del cauce se pudo observar en la zona de emplazamiento de la obra grandes boleos de hasta 2m y material granular más pequeño de 10 cm. También en el tramo aguas abajo se observo material granular con diámetros de 30 a 40 cm y un 10% de fondo duro de 1m de diámetro. También se observa material fino con un diámetro no mayor 10mm.

- En el margen izquierdo del cauce en el tramo aguas abajo, se tiene un lecho duro 0.8 m de diámetro aproximadamente.

- El flujo de la corriente en la zona donde se realizará el embalse de la obra, presenta una zona muerta hacía el margen izquierdo del cauce, con un flujo muy lento con una velocidad menor a los 0,5 m/seg, que puede favorecer procesos de sedimentación.

- Los afluentes secundarios tienen fuertes pendientes, que pueden estar vinculados a la transición entre zonas donde se produce erosión a las zonas de sedimentación. Cabe mencionar que en este afluente secundario se tienen boleos de hasta 3 m de diámetro.

A continuación se muestran fotografías del Río Negro, sitio donde se construirá la obra de captación. *Ver foto 2.*

Foto 2. (Derecha). Boleos de hasta 2 m en el lugar de emplazamiento de la obra.
(Izquierda). Zona muerta de velocidad muy baja.

3.2.2.1. CONDICIONES GEOMORFOLOGICAS:

El río Negro corre en sentido Oeste- Este, sin cambios de dirección pero con presencia de curvas pronunciadas. La zona del proyecto se encuentra entre zona de montaña y zona de colinas (obsérvese que la cota del proyecto no corresponde con la descripción del mapa) que pueden ser observadas en la *Fig 3.5.*

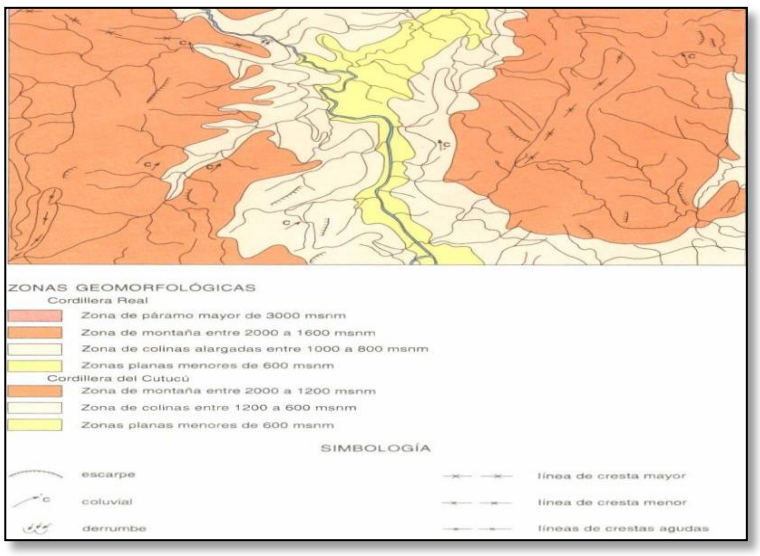


Fig 3.5. Esquema geomorfológico

Fuente: Informe de la primera fase del estudio en modelo Hidráulico para la obra de captación en el Río Negro del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo, elaborado por el PROMAS-U Cuenca 2012.

3.2.2.2. CONDICIONES GEOLOGICAS:

La obra se encuentra en una zona de rocas metamórficas, cercana a la zona de transición con la Formación Napo. *Ver Fig 3.6. A*sí tenemos esquistos cuarciticos blanquecinos, al igual que esquistos grafitosos micáceos en una menor proporción. Se identifican estructuras geológicas (fallas inferidas) que probablemente contribuyen a la inestabilidad de los taludes, encontramos además depósitos coluviales

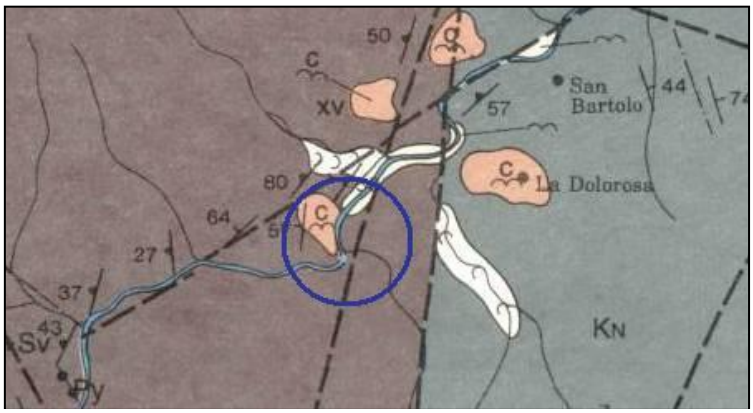


Fig 3.6. Zona geológica del proyecto

Fuente: Informe de la primera fase del estudio en modelo Hidráulico para la obra de captación en el Río Negro del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo, elaborado por el PROMAS-U Cuenca 2012.

3.2.3. CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL MODELO:

Se consideró los grados de libertad en planta tales como el ancho y la altura del calado para la implementación y posterior calibración del modelo, con lo cual se lograron establecer el cauce base para el modelo donde se tomaron en cuenta aspectos de variación temporal y espacial en el tramo de estudio.

Se identifico el caudal representativo que permita un mejor entendimiento del comportamiento morfológico, para lo cual se ha estableció en base a la hidrología un caudal formativo de 50 m^3/seg. Para validar procesos de transporte también se estableció otros caudales de interés que corresponden a los medios anuales (75 y 300 m^3/seg) correspondientes a periodos de retorno de 5 y 10 años, que se utilizaron en la calibración inicial, calibración de pendientes, procesos de erosión y de sedimentación, flujo preferencial.

3.3. CONCEPTUALIZACIÓN PARA EL MODELO

En el modelo implementado para la obra de captación de la central Hidroeléctrica San Bartolo en el río Negro, se planteo un estudio en lecho móvil, en lo referente al estudio morfológico se han analizando las siguientes condiciones:

- Procesos de erosión y sedimentación a lo largo del tramo de estudio.
- Identificación de los efectos (vórtices, socavación de pilas, disipación de energía) de la corriente sobre la estructura.
- Determinación del comportamiento (distribución y sentido) del flujo debido a la configuración geométrica de la obra de captación.
- Establecimiento de zonas críticas (acumulación de sedimentos permanentes y excesiva erosión).
- Cambios en la configuración morfológica de áreas de sedimentación en el cauce por efecto de la intervención.

3.4. ESCALAMIENTO DEL MODELO Y DEL HIDROGRAMA

3.4.1. ESCALAMIENTO DEL MODELO:

Se ha considerado un modelo de lecho móvil para el río Negro, para el estudio de características hidráulicas de transporte y depositación de sedimentos en áreas críticas. La escala se ha establecido en base al espacio físico disponible, la capacidad de suministro de caudal máximo y otras condiciones del flujo necesarios para la recreación de fenómenos a ser estudiados.

El espacio con el que se dispone es suficiente para la implementación del modelo del río Negro, la superficie que fue establecida es un área de 250 x 700 m, lo cual se logra con una escala horizontal de 1/50 (λl), no distorsionada en la que se han considerado aspectos relativos al flujo (Re: número de Reynolds) y disponibilidad de espacio.
Utilizando las formulas de la sección 2.3 se ha logrado establecer el factor de escala entre el modelo y el prototipo:

$$\lambda v = \sqrt{\lambda l}$$
$$\lambda a = \lambda l^2$$
$$\lambda q = \lambda a * \lambda v = \lambda l^2 * \lambda l^{1/2} = \lambda l^{5/2}$$

Donde:

λv	Escala de velocidades
λl	Escala Longitudinal
λa	Escala de áreas
λq	Escala de caudales

$$\frac{Qm}{Qp} = \lambda l^{5/2} = \left(\frac{1}{50}\right)^{5/2} = \mathbf{0.00005657}$$

$$\frac{Vm}{Vp} = \sqrt{\lambda l} = \sqrt{\frac{1}{50}} = \mathbf{0.14}$$

$$\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{lp}} = \lambda \mathrm{l} = \frac{1}{50} = \mathbf{0.2}$$

3.4.2. ESCALAMIENTO DEL HIDROGRAMA:

Se ha escalado el hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de 100 años (estudio hidrológico ver Fig.3.7), con el fin de considerar eventos hidrológicos que influirán en el comportamiento morfológico. Se utiliza el mismo procedimiento utilizado para el caudal, el factor de escala utilizado para el tiempo resulto:

$$\lambda t = \sqrt{\lambda t} = \sqrt{\frac{1}{50}} = 0{,}14$$

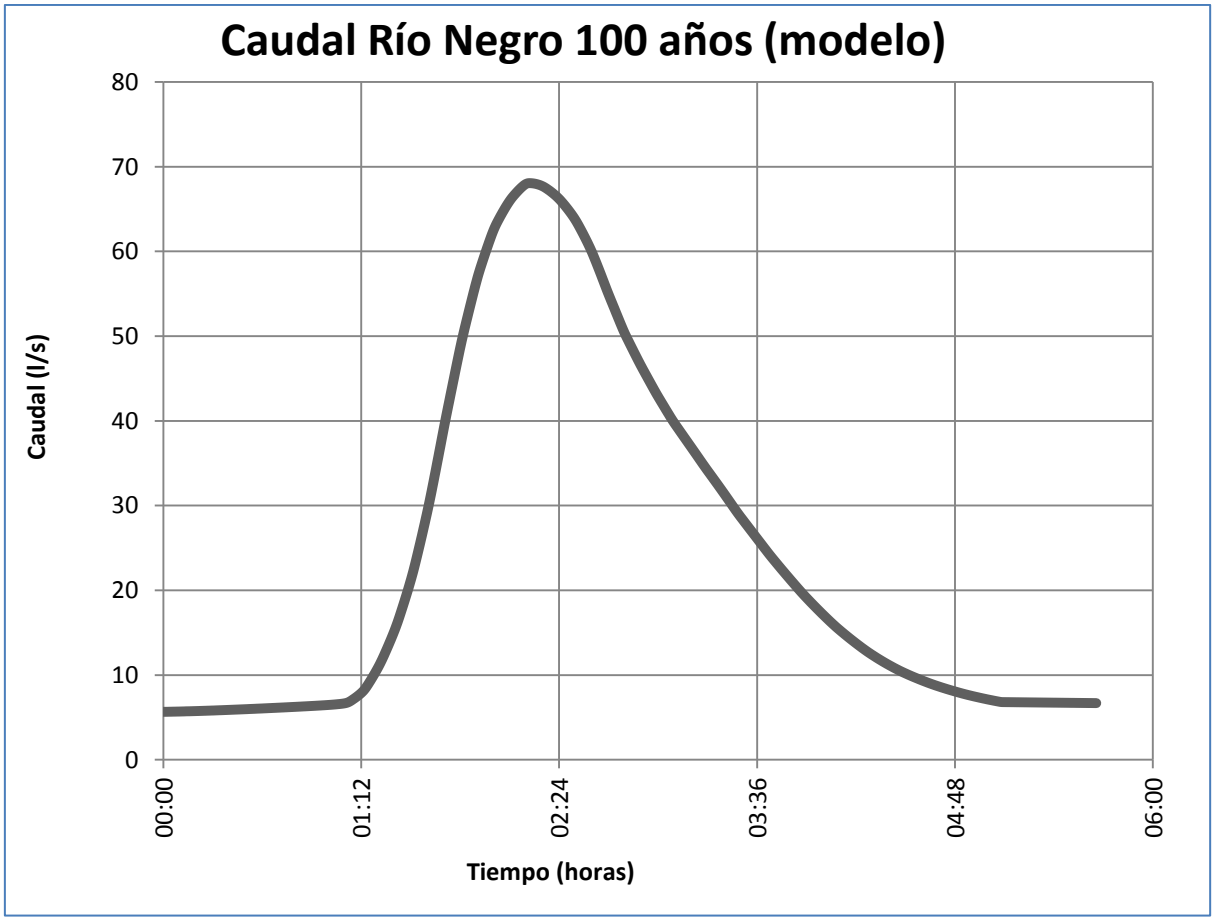


Fig 3.7. Hidrograma para el modelo

Hora	Caudal (l/s)	Hora	Caudal (l/s)	Hora	Caudal (l/s)
0:00:00	5,657	1:59:30	61,991	3:59:43	17,222
0:06:22	5,696	2:06:34	66,228	4:06:47	15,109
0:13:26	5,761	2:13:39	68,060	4:13:51	13,296
0:20:30	5,842	2:20:43	67,125	4:20:55	11,759
0:27:35	5,935	2:27:47	64,715	4:28:00	10,496
0:34:39	6,035	2:34:51	60,673	4:35:04	9,488
0:41:43	6,142	2:41:56	54,973	4:42:08	8,645
0:48:47	6,256	2:49:00	49,566	4:49:12	7,951
0:55:52	6,381	2:56:04	45,139	4:56:17	7,376
1:02:56	6,542	3:03:08	41,167	5:03:21	6,898
1:10:00	7,356	3:10:13	37,735	5:10:25	6,787
1:17:04	10,281	3:17:17	34,448	5:17:29	6,762
1:24:09	15,296	3:24:21	31,254	5:24:34	6,737
1:31:13	22,626	3:31:25	28,060	5:31:38	6,713
1:38:17	32,839	3:38:30	25,066	5:38:42	6,688
1:45:22	44,483	3:45:34	22,237		
1:52:26	54,614	3:52:38	19,588		

Tabla 3.2. Hidrograma para el modelo

3.5. EQUIPOS Y LABORATORIO

3.5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL PARA LA CONFIGURACIÓN DEL MODELO:

Para la realización de los ensayos en el modelo físico de la obra de captación del río Negro, en el laboratorio de Hidráulica del PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y el Suelo) de la Universidad se Cuenca, se dispone del espacio físico necesario para la construcción del modelo. Este laboratorio cuenta con instrumentos de medición necesarios para el estudio.

BOMBA HIDRAULICA

Para la circulación del agua y el control del caudal se cuenta con una bomba eléctrica que tiene una capacidad instalada de flujo 80 lt/ seg, y cuenta con las siguientes especificaciones. *Ver Tabla 3.3.*

Marca.	**Brook Crompton Parkinson Motors**
Nº de Serie.	K826R
Potencia.	15KW
Voltaje.	220
RPM.	1740
Amperaje.	53

Tabla 3.3. Características de la bomba Hidráulica

Para la regulación de la frecuencia se cuenta con un microprocesador marca SIEMENS, modelo MICROMASTER 440 (60 HZ).

Fuente: Informe de la primera fase del estudio en modelo Hidráulico para la obra de captación en el Río Negro del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo, elaborado por el PROMAS-U Cuenca 2012.

EQUIPO HIDROMECÁNIO Y CONTROLES ELECTRÓNICOS

El equipo hidromecánico consta de un sistema de válvulas en paralelo para una tubería de 4 pulgadas que termite la descarga y controlar los caudales de flujo durante las fases de experimentación y un sistema de recirculación que consta de un diámetro de 6 pulgadas el cual tiene un capacidad de almacenamiento de 8 m^3, el mismo que se regula mediante válvula check, este equipo es conectado mediante un sistema de controles electrónicos y de medición que han sido calibrados y adaptados para lograr la simulación en tiempo real de los caudales en el modelo. *Ver Foto 3.*

Foto 3. Bomba hidráulica y controles electrónicos

OTRO APARATOS:

En conjunto con el equipo hidromecánico y los controles electrónicos, se usaron para caracterizar la morfología y el comportamiento hidráulico del flujo, aparatos tales como:

- EQUIPO DE NIVELACIÓN: mira, nivel, etc. Se verifican las pendientes del cauce, se emplea un equipo de nivelación común.

- TRAZADORES: Permite medir la velocidad y la visualización de flujo para lo cual se utiliza un colorante (violeta geneciana).

CANAL

Se dispone de un canal de fibra de vidrio de 5m de ancho, 15 m de longitud por 0,7 m de alto, para la construcción del modelo morfológico del río Negro y su obra de captación. Se cuenta con un tanque de ingreso en la cabecera, el cual posee un vertedero de 1,1 m de ancho que permite el paso del flujo y dos tanques de almacenamientos en la parte inferior con compuertas que regulan los niveles del cauce del río. *Ver foto 4.*

Foto 4.Compuerta y tanques de sálida

TOLVA DOSIFICADORA

En la cabecera del canal se cuenta con una tolva permite la incorporación de las tasas de sedimentos y debidamente escaladas para los diferentes flujos de estudio.

3.6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO:

3.6.1. CONFIGURACIÓN DEL CAUCE:

Para la implementación del cauce natural de río, se procedió a colocar sacos de arena para lograr representar la topografía de la zona, luego de lo cual se impermeabilizo mediante chova, se colocó el material escalado para el lecho y se realizó la calibración del modelo.
Ver foto 5.

Foto 5. Construcción del cauce del Río Negro

3.6.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN:

La estructura de captación se realizó con madera, combinada con materiales que permitan la visualización del flujo mediante una plancha de acrílico en la entrada de la bocatoma, así como el canal de conducción que tiene una sección embaulada a la sálida de la toma y su posterior sección circular. Para garantizar el lavado eficiente de sedimentos en la obra de toma se cuenta con cuatro compuertas taintor (radiales). *Ver foto 6.*

Foto 6. (Arriba). Fotos de la estructura de la obra de captación.
(Abajo). Compuertas taintor (radiales)

3.7. ESTRUCTURACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ESTUDIO.

Para la implementación y estudio del modelo morfológico se siguieron las siguientes directrices:

3.7.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO:

Una vez construido y emplazado el modelo, se procedió con su calibración para validar y ajustar condiciones que rigen los fenómenos a estudiar hasta lograr concordancia entre el modelo y el prototipo.

Con una topográfica inicial aproximada y conformado el lecho se procedió al envío de tasas de transporte de sedimento para caudal formativo y otros caudales de interés, con esto se estableció un cauce que refleje condiciones equilibrio en cuanto a erosión y sedimentación.

Para lograr replicar las características encontradas en el cauce natural del río (prototipo), se colocaron escalones mediante lecho rocoso con la finalidad simular el comportamiento del flujo.

La calibración del modelo en cuanto a transporte de sedimento fue completa cuanto se logró replicar ciertas condiciones morfológicas encontradas en el cauce natural del río (zonas de socavación).

Se ha utilizado expresiones que representen de una mejor manera el comportamiento de los procesos de transporte de fondo entre las que tenemos: Nielsen (1992) Modelo Simplificado, Van Rijn (1984), Meyer- Peter (1949,1951).Se estudiaron los valores de la tasas de los autores indicados, analizando que las formulaciones no presenten valores sobrestimados en el proceso de transporte y sedimentación además en la configuración de la pendiente longitudinal del cauce.

Se calibraron y validaron parámetros relacionados con el flujo sin emplazamiento de la obra, se verificaron los calados, velocidad y dirección del flujo preferencial en el modelo estableciéndose si se producen incompatibilidades significativas.

3.7.2. EMPLAZAMIENTO DE LA OBRA

Una vez calibrado el modelo se emplazará la obra de captación y se procedió al envió de las tasa calibradas para los respectivos caudales. Se verificaron las condiciones de flujo para el modelo físico de la obra proyectada calibrando los principales componentes de la estructura como: azud, compuertas, y acceso a la conducción.

Se analizaron los cambios morfológicos que las tasas de transporte y caudales de modelación (50 “formativo”, 75 y 300 m^3/seg) y otros de interés provocaran en el cauce bajo ciertas condiciones.

Al inicio no se colocaron muros ni obra de disipación aguas abajo de la toma con la finalidad de analizar los efectos directos de erosión y depositación sobre el lecho, y los cambios en el comportamiento del flujo que se tendrán al colocar la estructura.

Luego se colocaron los muros y el cuenco disipador aguas abajo de la toma con los tasas establecidas, se visualizaron mediante colorantes el flujo (dirección, sentido y velocidad) en la zona de embalse. También se analizaron el efecto erosivo del funcionamiento de las compuertas sobre el cauce aguas abajo.

Posteriormente se observaron las características dejadas en el lecho tras el paso de un caudal, distinguiéndose zonas criticas de erosión y depositación con su respectivo avance. Asimismo se identificaron y fueron medidas las formas producidas en el lecho (arrugas, dunas, lecho plano, etc.).

3.7.3. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES:

Se estableció e identificaron variables que nos permitió analizar el comportamiento del flujo y los cambios morfológicos que se presentaron en el cauce bajo ciertos escenarios de experimentación.

VARIABLES CONTROLABLES:

- *Caudal:* se establecieron para el estudio de las características morfológicas del cauce los caudales de 50 m^3 (formativo), 75 y 300 m^3/ seg (periodos húmedos anuales).

- *Tasas de transporte*: se alimentó el flujo con tasas teóricas determinadas en la fase de calibración del modelo, se validó estas tasas para los caudales de interés de 50 m^3/seg (formativo), 75 y 300 m^3/seg (periodos húmedos anuales). Se analizó la respuesta morfológica del cauce en cuanto a procesos de erosión y sedimentación, sin considerar en primer lugar obras previstas para el mejoramiento del lavado.

VARIABLES DEPENDIENTES:

Para la identificación de efectos y procesos que se desarrollaron debido a la modificación propuesta, se tomaron en cuenta aspectos de orden cualitativo, para lo cual se utilizaron métodos como la observación y fotografías. Las variables a ser analizadas son las siguientes:

- Flujo preferencial.

- Distribución de velocidades en la zona de intervención de la obra.

- Configuración morfológica referente a zonas de potencial erosión o sedimentación que produce la geometría propuesta para la obra a lo largo del cauce.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Foto 7.Lecho del cauce durante la calibración del modelo.

SIN TASAS DE TRANSPORTE

- Con caudal formativo, se observó que las corrientes del flujo presentaban convergencia y divergencia en las curva, como consecuencia de ello se producen zonas de erosión (entrada a la curva) y depositación de material (salida de la curva). *Ver foto 8.*

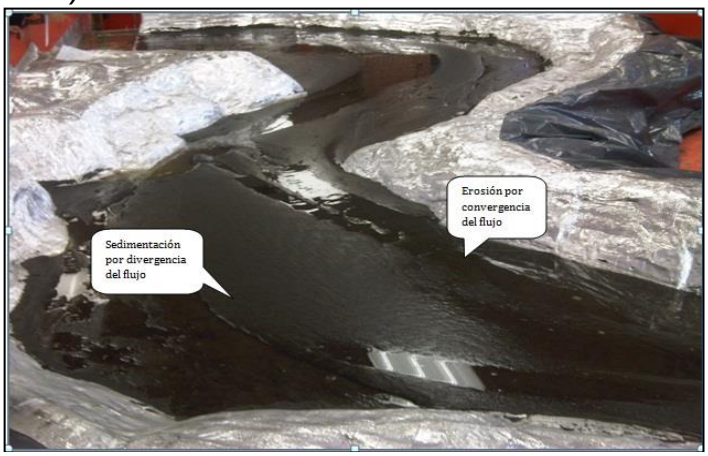


Foto 8. Zonas de sedimentación y erosión del material

- En la zona en donde se realizará la disipación de energía (aguas abajo del emplazamiento de la obra) se produce una fuerte erosión del material cambiando la configuración del lecho.

- Al finalizar cada prueba se observan modificaciones en el perfil longitudinal del cauce (pendiente promedio microescala 2% en la zona del proyecto) como consecuencia de la erosión y depositación generada, obteniendo como resultado pendiente bajas (menores al 0,5%) aguas abajo del lugar previsto para la obra. A su vez se visualizan cambios en la pendiente de la zona del futuro embalse (entre 0,8 y 1%), al igual que en la cola del embalse las pendientes se modificaron (mayores al 1%).

- Para una mejor calibración del modelo se procedió a colocar material granular en lecho de 2cm (1m el prototipo) en la zona donde se realizará el embalse, con esto se simula un escalón que se encuentra en el cauce real con el objetivo de ayudar a implementar de mejor manera el comportamiento del flujo, en la misma zona se coloca material de 4cm (2m en prototipo) de diámetro en la curva donde estará la toma para reproducir un lecho rocoso que se encuentra en el cauce del prototipo .También se coloca material de 2cm (1m prototipo) para intentar simular un segundo escalón detectado en la zona cóncava. *Ver Foto 9.*

Foto 9. Calibración del lecho, con lecho rocoso

Se realizaron varios ensayos con diferentes caudales y tasas de sedimentación, que se describen a continuación en la tabla 4.1:

CAUDALES DE LOS ENSAYOS					
MODELO SIN ESTRUCTURA					
h m (cm)	**h m (m)**	**B m (m)**	**Qm (lt/seg)**	**Qp (m3/seg)**	**Tasa de sedimentos kg/s**
1,8	0,018	1,1	5,40	95,50	0,105
1,6	0,016	1,1	4,54	80,34	0,168
1,5	0,015	1,1	4,13	73,06	
1,3	0,013	1,1	3,34	59,17	0,059
4	0,04	1,1	17,14	303,29	
4,2	0,042	1,1	18,36	325,04	0,250
1,9	0,019	1,1	5,84	103,38	0,077
1,2	0,012	1,1	2,97	52,57	
1,4	0,014	1,1	3,73	66,00	0,025
0,9	0,009	1,1	1,94	34,34	0,025

Tabla 4.1. Caudales para calibración del modelo

En el *anexo A.1*, se muestran velocidades y calados obtenidos en la secciones de control en la cola de embalse, además de un esquema de ubicación de las mismas.

CAUDAL DE 75- 95 m^3/seg.

- En los ensayos se enviaron tasas de transporte al cauce obteniéndose pendientes menores al 2% antes y después de cada ensayo (1- 1,6%). Conforme se aumenta el caudal se consigue calados menores en la cola del embalse (0,8 a 1m en prototipo), pero las velocidades se incrementan

- Con tasas de sedimentación entre (0,105- 0,168 kg/seg), se produce un exceso de sedimentos en la futura zona de embalse estas tasas son excesivas para el cauce. *Ver foto 10.* En la misma zona se formaron dunas con una extensión 1,3m (65 m prototipo) debido a velocidades bajas y al desarrollo de flujo subcritico, lo que está de acuerdo con la bibliografía. *Ver foto 11.*

Foto 10. Zona de sedimentos

Foto 11.Formación de dunas en la zona del embalse.

- Debido a la configuración topográfica del cauce en la cola de embalse, se obstaculiza el flujo generando un cambio en la dirección de la corriente que provoca erosión local (zona de erosión 1) en el margen izquierdo como consecuencia de la gran turbulencia generada. Al final de la cola del embalse por el estrechamiento del cauce provoca erosión en el margen derecho (zona de erosión 2). En la zona donde se construirá el embalse el flujo que entra en la curva erosiona el margen exterior sin embargo debido a un cambio en la topografía provocando una zona de erosión local (zona de erosión 3). *Ver Fig 4.1.* Estas zonas permanentes a lo largo de todas las pruebas.

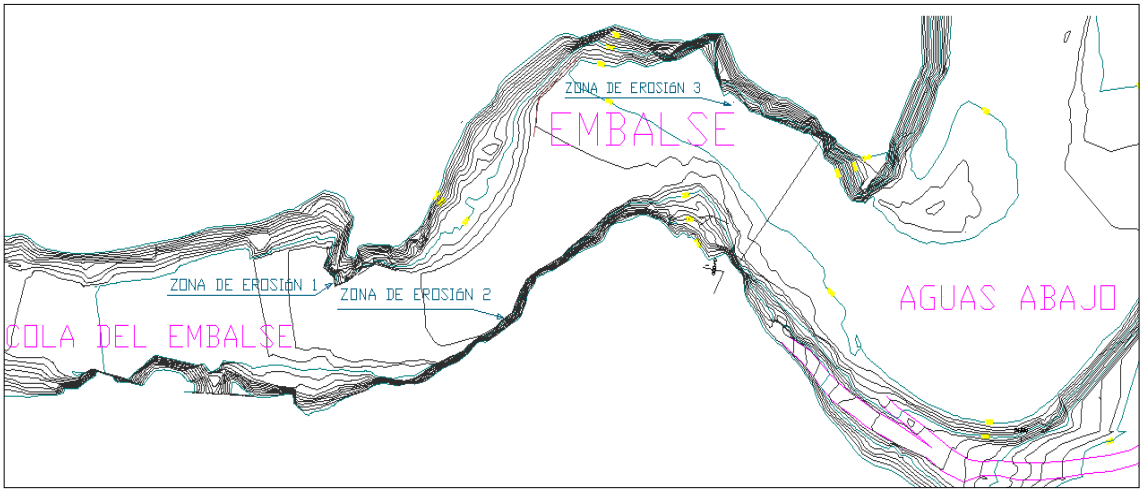


Fig 4.1. Esquema de ubicación de zonas características de erosión

CAUDAL DE 50- 65 m^3/seg.

En la zona aguas abajo, se construye un escalón en el margen derecho al mismo nivel de la quebrada encontrada en el río.

- Para tasas de sedimentación de (0,059 kg/seg), se obtiene el equilibrio en el cauce, no se observa sedimentación excesiva en la zona de embalse. Tasas inferiores (0,025 Kg/s), no ocasionaron problemas serios de erosión en la cola del embalse.

- En la zona cóncava (aguas abajo) se coloca material granular de unos 5 cm (2,5m) en el margen izquierdo esto ocasiona que el flujo se redirecciona hacia el margen derecho provocando una erosión más notoria conforme se aumenta el caudal (velocidad y capacidad de transporte altas) *Ver foto 12.*

Foto 12. Erosión aguas abajo en la zona cóncava.

- Al no enviar una tasa de trasporte en la zona de embalse (zona de menor pendiente) se produce una gran depositación de material que proviene de la erosión de la cuenca aguas arriba. *Ver foto 13.* En la misma zona se coloca material granular de 4 cm (2m) de diámetro.

Foto 13. (Izquierda) material granular transversal en el embalse
(Derecha) Depositación de material con caudal formativo

- Se produce una zona muerta (la corriente del flujo es casi imperceptible) en el margen izquierdo del embalse donde hay tendencia de depositación del material fino debido a bajas velocidades.

- Al aumentar el caudal se producen cambios en la forma del lecho por el incremento en la velocidad ocasionando que las dunas pronunciadas se alarguen hasta casi formar un lecho plano. *Ver foto 14.*

Foto 14. (Izquierda) Dunas pronunciadas (Derecha) Desaparición de dunas

- Se establecen tres secciones de control en la cola del embalse obteniéndose calados alrededor de 0,75m (prototipo) para las secciones 1 y 3 con velocidades cercanas 2 m/seg (prototipo), mientras en la sección 2 debido al estrechamiento del cauce el alado disminuye y la velocidad aumenta a 3,3 m /seg (prototipo). *Ver Anexo A.1*

CAUDAL 300 – 325 m^3/ seg

- En la cola del embalse la capacidad de transporte y la velocidad aumentan provocando una fuerte erosión en los márgenes depositándose la mayor parte del sedimento en la zona central. *Ver foto 15.*

Foto 15. Erosión márgenes cola del embalse

- Debido al lecho rocoso colocado en el cauce, el flujo del río se ve desviado al margen izquierdo en la zona de embalse, los caudales ensayados provocaron gran depositación de sedimentos en interior de la curva de igual manera se observa la formación de dunas en una longitud de 1 m (50m prototipo). Las zonas de erosión 1, 2 y 3 persisten y se alargan.

- Al comparar los efectos erosivos de este caudal con el de 300 m^3/seg en la cola del embalse con el menor de ellos se observa una mayor sedimentación. *Ver foto 16.* El material arrastrado de la cola del embalse por el caudal de 300 m^3/seg se deposita en mayor cantidad en la zona de embalse en contraste al dejado por el caudal menor. *Ver foto 17.*

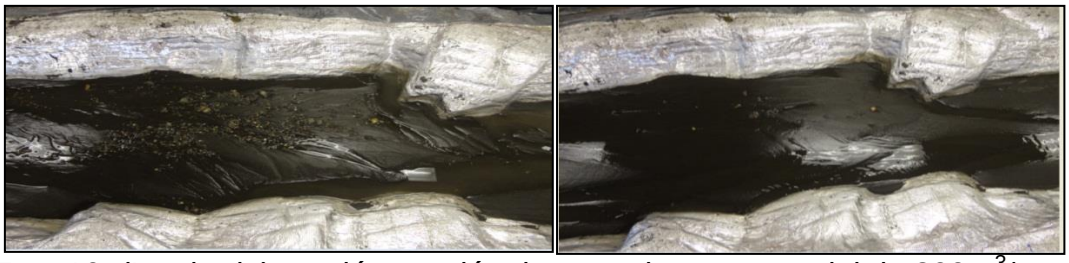


Foto 16. (Izquierda) erosión sección de control con un caudal de 300m^3/seg, (Derecha) sedimentación sección de control con un caudal de 100 m^3/seg

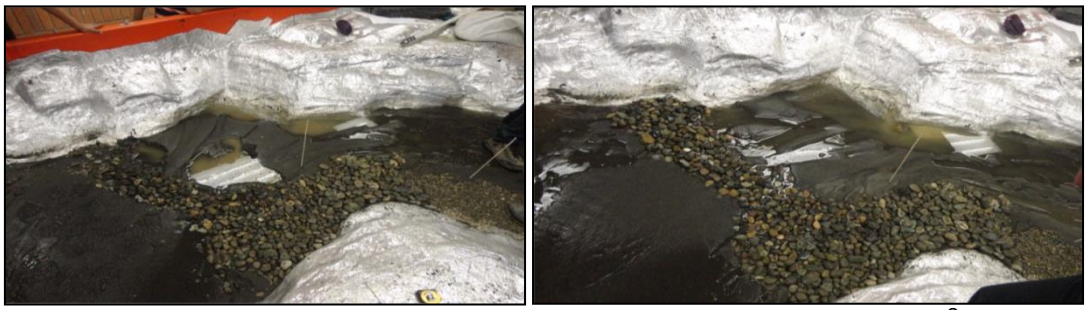


Foto 17. (Izquierda) Zona de embalse con un caudal de 300 m^3/seg, (Derecha) Zona de embalse con un caudal de 100 m^3/seg

- En el margen izquierdo del embalse siempre se produce una zona muerta donde se deposita material más fino si ser afectado por el flujo preferencia. . *Ver foto 18.*

Foto 18. (Izquierda) Flujo principal (Derecha) Zona muerta, acumulación de material fino

CAUDAL 34 m^3/seg

- Con una tasa de sedimentación (0,025 kg/s) se observar un cambio en la configuración del lecho producido por la disminución de la velocidad lo que deja caer material en forma de islas pequeñas como se puede v*er foto 19.*

Foto 19. Modificación el lecho y formación de pequeñas islas.

- Se puede ver la formación de pequeñas dunas en la cola del embalse que antes no existían debido a que se dieron las condiciones necesarias

Luego de realizarse los ensayos con diferentes tasas de transporte se observa que las más apropiadas para lograr el equilibrio en el cauce son las proporcionadas por la formulación de Nielsen. A continuación en la tabla 4.2 se presentan las tasas obtenidas:

Caudal prototipo (m^3/s)	**Tasas de Transporte (kg/s)**
50	0,055
75	0,096
300	0,33
800	0,72

Tabla 4.2. Tasas de Transporte de fondo Calibradas para el Modelo

FUENTE:(Beltrán y Ordoñez, 2012)

4.2. EMPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Una vez calibrado el modelo se emplaza la estructura de captación con el objetivo de analizar los cambios morfológicos producidos en el cauce.

A continuación en la Tablas 4.3 y 4.4, se muestran los resultados obtenidos para los siguientes caudales ensayados:

ZONAS DE EROSIÓN Y SOCAVACIÓN Y DUNAS									
Qp (m3/seg)	ZONAS	L m(cm)	b 1m (cm)	h m (cm)	L p (m)	b 1p (m)	h p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
43 a 181	1	50	-	9	25	-	4,5	Muro aguas Abajo.	Cola del embalse
	2	85	-	9	42,5	-	4,5		
	1	66	-	8	33	-	4		
	2	100	-	5	50	-	2,5		
	DUNAS	L m(cm)	b 1m (cm)	b2 m (cm)	L p (m)	b 1 p(m)	b2 p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	160	82	-	80	41		Muro aguas Abajo.	Cola del embalse
	2	190	40	30	95	20	15		
	3	162	48	20	81	24	10		
	4	300	34	-	150	17	-	Embalse	Embalse
59.2 a 210	ZONAS	L m(cm)	b 1m (cm)	h m (cm)	L p (m)	b 1p (m)	h p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	106	9	7	53	4,5	3,5	Muro de grava en el embalse	Cola del embalse
	2	120	25	11	60	12,5	5,5		
	1	160	15	3,6	80	7,5	1,8		
	2	120	103	4	60	51,5	2		
	DUNAS	L m(cm)	b 1m (cm)	b2 m (cm)	L p (m)	b 1 p(m)	b2 p (m)		
	1	240	83	-	120	41,5	-		
87.8	ZONAS	L m(cm)	b 1m (cm)	h m (cm)	L p (m)	b 1p (m)	h p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	83	11	6	41,5	5,5	3	Muro de grava en el embalse	Cola embalse
	2	100	20	6,5	50	10	3,25		
	DUNAS	L m(cm)	b 1m (cm)	b2 m (cm)	L p (m)	b 1 p(m)	b2 p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	290	50	-	145	25	-	Muro de grava en el embalse	Cola embalse
	2	150	25	-	75	12,5	-		Embalse
	3	120	47	-	60	23,5	-		
181,8	ZONAS	L m(cm)	b 1m (cm)	h m (cm)	L p (m)	b 1p (m)	h p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	110	25	5,3	55	12,5	2,65	Cola embalse	Cola
	2	130	35	7,8	65	17,5	3,9		

									embalse
	DUNAS	L m(cm)	b 1m (cm)	b2 m (cm)	L p (m)	b 1 p(m)	b2 p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	280	40	-	140	20	-	Muro de grava en el embalse Abierta las Compuertas.	Cola embalse
	2	170	37	-	85	18,5	-		Embalse
	3	190	45	-	95	22,5	-		Embalse
168	ZONAS	L m(cm)	b 1m (cm)	h m (cm)	L p (m)	b 1p (m)	h p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	110	20	4	55	10	2	Muro de grava	Cola embalse
	2	130	25	6,5	65	12,5	3,25		
	2	120	100	4	60	50	2		A. Abajo
	DUNAS	L m(cm)	b 1m (cm)	b2 m (cm)	L p (m)	b 1 p(m)	b2 p (m)	CONDICION	UBICACIÓN
	1	230	40	-	115	20	-	Muro de grava	Cola embalse

Tabla 4.3. Dunas y zonas de erosión y **socavación** con emplazamiento de la obra

CAUDALES CON SU RESPECTIVAS VELOCIDADES											
Qm (m3/s)	Qp (m3/s)	V. m Derecho		V. m. Transversal		V.m.Izquierdo		V.m.Central		V. Compuertas	
		Vm(m/s)	Vp(m/s)	Vm(m/s)	Vm(m/s)	Vm(m/s)	Vp(m/s)	Vm(m/s)	Vp(m/s)	V m(m/s)	V m(m/s
2,97	53	0,032	0,23	0,0378	0,27	-	-	-	-	-	-
4,33	77	0,035	0,250	0,047	0,331	-	-	-	-	-	-
7,7	137	-	-	0,53	3,73	-	-	0,404	2,86	-	-
		-	-			-	-			-	-
10,3	182	0,661	4,673	0,554	3,914	0,336	2,377	0,586	4,143	0,540	3,815
17,14	303	0,491	3,47	0,385	2,722	0,527	3,729	0,829	5,865	-	-

Tabla 4.4. Resultados de velocidades de los ensayos.

MUROS DE GRAVA Y LECHO ROCOSO SÁLIDA DE LAS COMPUERTAS.
CAUDAL ≥ 100 $m^{3/}s$

- Abriendo las compuertas 2 cm y colocado material de 4 cm (2 m) en los márgenes del rio aguas abajo se observa que la capacidad de la corriente es superior al peso del muro por lo que es dispersado provocando erosión en el cuenco disipador y un cambio en la dirección del flujo del agua hacia el margen derecho. *Ver foto 20.*

Foto 20. (Izquierdo) Muro en los márgenes aguas abajo de la estructura (Derecho) Influencia con caudales mayores al formativo

- Para caudales entre (100 – 150) m^3/s la profundidad del zona a la salida de las compuertas (zona de socavación 2) es de 10 cm (5m) esta fuerte erosión provocará futuros daños a la estructura.

- En el embalse existe un flujo preferencial que se dirige hacia las pilas 1 y 2 de la estructura produciendo una socavación de 2 cm (1m) debido a la formación de un vórtice en la compuerta 2.

- Para un caudal de 140 m^3/s se puede observar al lanzar la tinta que esta tiende a acumularse en el margen izquierdo siendo la zona de efecto de lavado marcada con línea discontinua lo cual nos índica que todo el material más fino será depositado en el margen izquierdo a partir de la línea (ver foto 21) manteniendo la compuerta de lavado cerrada.

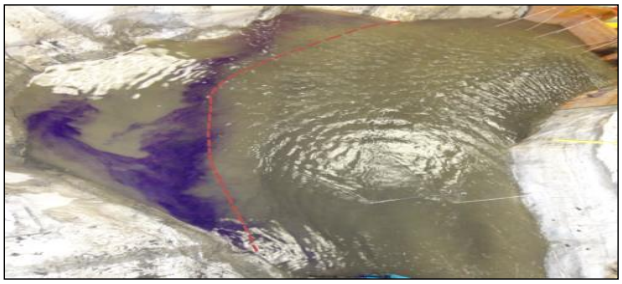


Foto 21. Mancha de tinta ubicada en la zona de efecto de lavado

CAUDAL 200m^3/s

- Al estar totalmente lleno el embalse se forma varias líneas de corriente con diferentes sentidos una al frente de la compuerta con flujo horario y otra con flujo antihorario en el margen izquierdo.

- Abriendo simultáneamente las compuertas 1 y de lavado se forma un flujo preferencial que se dirige hacia la compuerta 1 que provoca una zona de sedimentación en el margen derecho, pese a no enviar una tasa de sedimentos en la cola del embalse los zonas de erosión 1 y 2 no sufrieron cambios significativos en sus dimensiones.

- Con embalse lleno, en la cola del embalse se paso de un régimen rápido a uno lento (disminución de la velocidad) que favoreció la formación de dunas a lo largo de 2,30m (115m) y una amplitud de 54 cm (27 m) que anteriormente no lograban desarrollarse.

CAUDAL 50-75 m^3/s

Con el objetivo de observar el efecto de lavado en el margen izquierdo se coloco material atrás del azud de forma irregular incrementado 2cm (1m) la cota del embalse se incrementaran los caudales hasta notar el lavado del sedimento todo esto con las compuertas abiertas y sin ningún tipo de lecho disipador.

- En la zona de embalse existe un flujo presencial en la parte central del cauce que se desplaza hacia las compuertas 2 y 3, en donde al lado derecho de este flujo se deposita material grueso. Se visualiza una corriente con menor velocidad que no afecta la zona muerta del margen izquierdo permitiendo el depósito de material fino en esta zona. *Ver foto 22.*

Foto 22. Comportamiento del flujo.

- Debido al cambio del patrón del flujo en las pilas se produce socavación local con una profundidad de 3,8 cm (1,9m) en la zona erosionable mientras que aguas arriba de las compuertas el calado normal es de 2 cm (1 m), provocando una sobreelevación del agua en las pilas de 2 cm (1m).

- Para este caudal se puede ver que existe un buen funcionamiento de la compuerta de lavado y la compuerta 1, además se nota un ligero movimiento de material en la compuerta 2.

- Se elevó el caudal a 67m^3/s enviando una tasa transporte se empieza a azolvar el margen derecho del cauce esto reduce el efecto de lavado en las compuertas que produce un redireccionamiento del flujo hacia el margen izquierdo, provocando que el material depositado en esta zona sea lavado parcial por las compuertas 2 y 3.

-

- En la superficie del agua se observa ondulamientos que dan origen a la formación de 2 dunas en la zona del embalse con un calado de 3 cm (1,5 prototipo). Las zonas de erosión 1 y 2 se siguen formando

- Debido a la gran velocidad con la que el flujo sale de las compuertas la erosión aguas abajo de la estructura se extiende 2,4m (120 m prototipo).

- Con un caudal de 43 m^3/seg, se procedió a embalsar el agua formándose flujos con diferentes direcciones, un flujo antihorario en la zona muerta y otro horario a nivel de la bocatoma. Una vez se tuvo carga sobre el azud se tomaron las velocidades de los flujos observados en el margen derecho, uno frente a la bocatoma y otro que va de ésta hacia el azud obteniéndose velocidades menores a 1 m/seg que no son suficientes para producir arrastre de material. De la misma manera se tomo la velocidad en el margen izquierdo del flujo uniforme que va hacia el azud. *Ver foto 23.*

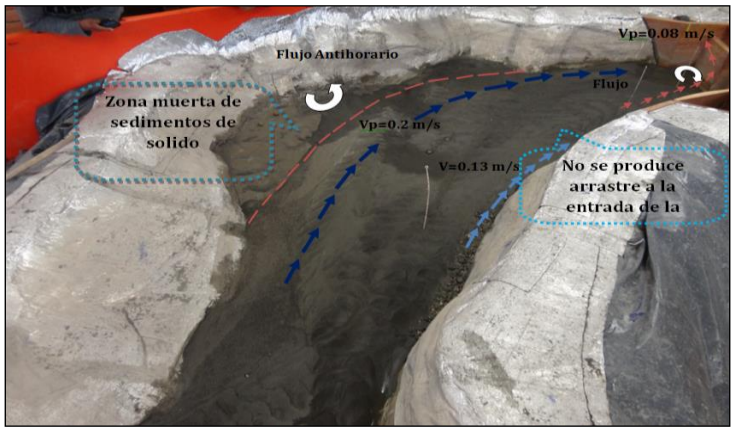


Foto 23. Esquema de distribución de flujo y velocidades.

- Con caudal 18 m^3/s sobre el azud, velocidad con el embalse lleno es totalmente uniforme lo que se puede observar lanzado tinta cuya mancha tiene un recorrido en forma lineal.

- Para caudales entre 50-60 m^3/seg no se produce efecto de lavado del material depositado a la entrada de las compuertas aunque se alterne su funcionamiento y se varíe su abertura. También se observa la formación de un vórtice antihorario de 2cm de profundidad entre las pilas de la compuerta 3.
- Al estar las compuertas abiertas el calado en la zona de embalse no es lo suficientemente grande para permitir la formación de las dunas (su altura es proporcional al calado) en abanico.

- En el rango de caudales de (5 -11) m3/s circulando en el azud no se presenta problemas para disipar la energía en la plataforma de diseño propuesta.

-

- Con compuertas abiertas, el efecto erosivo de la compuerta de lavado se extiende 60 cm (30m) aguas abajo de la obra y el avance de material transportado unos 2.2 m (110m prototipo) de la obra. El flujo a la sálida de las compuertas es supercritico. *Ver foto 24.*

Foto 24. Avance del material transportado aguas abajo

- Con un caudal de 75 m^3/s se termina de lavar el material colocado detrás del azud. Se forman dunas las dunas en abanico en la zona de embalse y el flujo preferencial con las compuertas abiertas sigues estando en la parte central del cauce.

CAUDAL 90 m^3/s

- Se envía una tasa de 0,1 kg/seg que ocasiona una acumulación de sedimentos en el margen izquierdo del embalse que cambia la morfología del cauce esto origina un flujo antihorario detrás del azud.

- En el embalse con compuertas abiertas se mide velocidades en la parte central del cauce cuando se tiene un calado de 2,4 cm (1,2m) obteniéndose velocidades cercanas a los 3 m^3/seg (prototipo).

- Con este caudal sigue formándose las dunas en abanico en el embalse, las zonas antes mencionadas se mantienen. *Ver foto 25 y Tabla 4.3.*

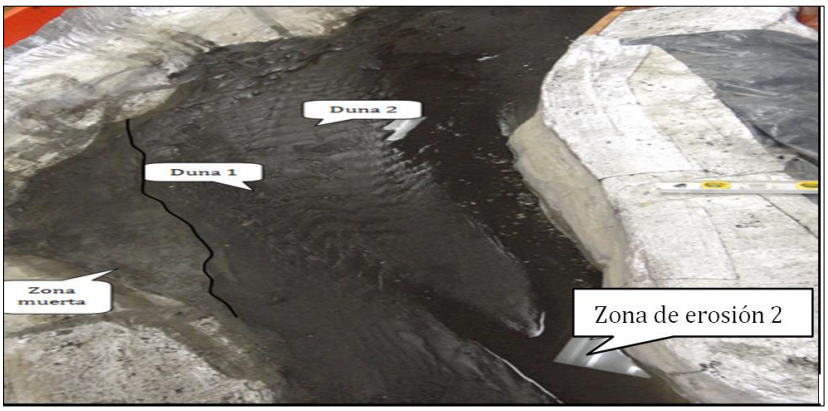


Foto 25. Dunas de abanico en el embalse

-
-

- Además de la erosión que se mantiene en la zona 2, el material depositado en el margen derecho del embalse se mantiene, es decir, sin variación en su cota.

CAUDAL 100- 180 m^3/s

- Para este rango de caudales en la zona del embalse en la parte central , se miden los calados y se obtienen las velocidades que se presentan la siguiente Tabla 4.5:

Qp (m3/s)	H m (cm)	B m (cm)	Vm(m/s)	Vp(m/s)
111,4	2,8	70	0,62	4,37
142	3,2	80	0,49	3,49
181	3,4	105	0,60	4,3

Tabla 4.5. Tabla de velocidades para caudales entre 100-180 m^3 /s

- En la cola del embalse y en embalse se han formado las dunas características, los zonas de erosión 1, 2 y las zonas de socavación 3 (encontrado en frente de las pilas) y 4 se mantienen.

MURO DE GRAVA ATRÁS DEL AZUD.

Con la finalidad de analizar la influencia de flujo en los cambios de configuración del lecho en la entrada de la estructura se considero la colocación de un muro de grava con pendiente aproximada de 6%.

Los caudales analizados en estas condiciones son los siguientes ver tabla 4.6.

Qm (m3/s)	Qp (m3/s)	V. m Derecho		V. m. Transversal		V.m.Izquierdo		V.m.Central		V. Compuertas		Condiciones
		Vm(m/s)	Vp(m/s)	Vm(m/s)	Vm(m/s)	Vm(m/s)	Vp(m/s)	Vm(m/s)	Vp(m/s)	V m(m/s)	V m(m/s)	
7,7	136,6			0,53	3,73			0,404	2,86			Embalse lleno
10,3	181,8	0,661	4,673	0,554	3,914	0,336	2,377	0,586	4,143	0,540	3,815	Abierta compuerta 3
5.	87,8											
6,8	119,7											

Tabla 4.6. Caudales ensayados con estas condiciones.

CAUDAL 120 m^3/seg

- Con embalse lleno, con carga en el azud 3,4 cm (1,7 m) y con un caudal de 30 m^3/seg circulando a través de la tubería se midieron velocidades en el embalse. *Ver foto 27.* Quedando demostrado que las menores velocidades se obtienen cerca de la zona muerta.

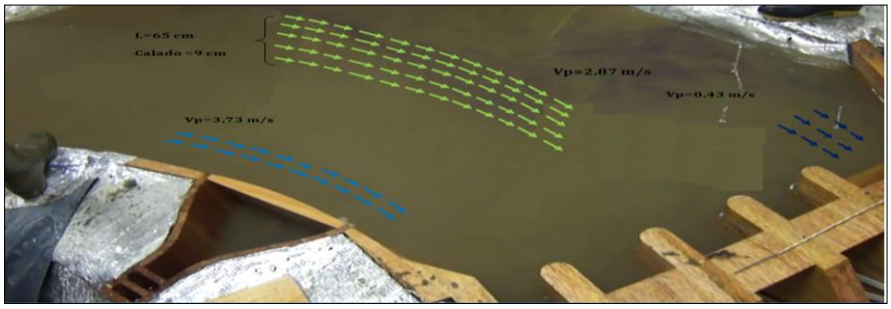


Foto 26. Distribución del flujo y velocidades en un embalse lleno

CAUDAL 180 m^3/s

- Debido a la colocación del muro con un talud de relación 1:1 con material granular de 4 cm (modelo) en el margen izquierdo se produce una reducción de la sección transversal en el embalse provocando un aumento en las velocidades del flujo, sin embargo la distribución de la velocidad no es uniforme, encontrándose las menores velocidades de la corriente cerca de la zona muerta. *Ver foto 26.*

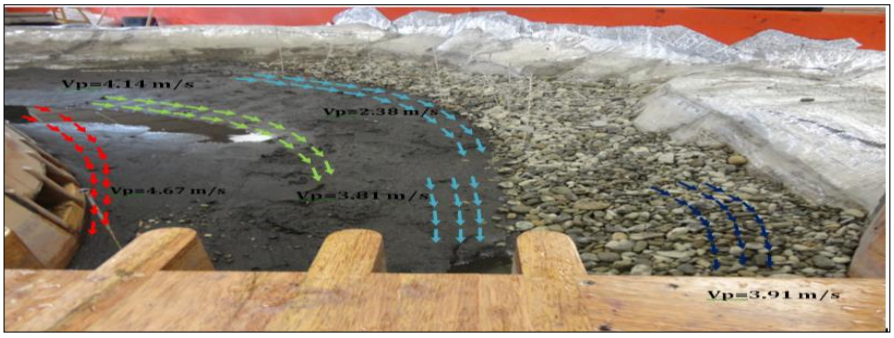


Foto 27. Dirección y velocidad del flujo en el embalse con muro de grava

BLOQUEO DEL AZUD Y BOCATOMA CON SACOS.

Con sacos se bloquea el paso del agua hacia la bocatoma, el canal de lavado y el azud con el objetivo de que el flujo ingrese solo por las compuertas.

CAUDAL 160 m^3/s

- Al enviar una tasa de transporte menor a la calibrada, el material que se erosiona en la cola del embalse es depositado en el margen derecho, se mide la velocidad en el margen izquierdo (compuerta 3) siendo de 3.18 m/seg (prototipo) lo que permite un mayor arrastre de material aguas abajo.

CAUDAL 300 m^3/s

- Con compuertas abiertas se obtiene velocidades menores a 4 m/seg (prototipo) en el margen derecho e izquierdo en la zona de embalse, en la parte central la velocidad aumenta, la velocidad de la corriente cercana a la compuerta 1 es menor a la velocidad del margen derecho. En las compuertas se forman vórtices antihorario.

- Al producir embalsamiento se forman dunas aguas arriba y aguas abajo de la obra, su desarrollo es directamente proporcional al calado por lo que en la parte cóncava debido a que existe un menor calado estas se desarrollan menos pronunciadas pero con una longitud y menor. El flujo preferencial erosiono el sector aguas arriba de la compuerta 1. *Ver foto28*

Foto 28. Socavación local frente compuertas

- Aguas abajo de la estructura no se ha colocado disipador alguno por lo que la longitud del efecto erosivo del flujo es de 2m (100 m) consecuencia de esto la cota del lecho ha aumentado luego de la zona erosionable. *Ver foto 29.* Durante todo el ensayo no se envía una tasa de transporte.

.

Foto 29. Influencia erosiva únicamente de las compuertas

ESTRUCTURA PARA LAVADO EN EL MARGEN IZQUIERDO Y PLATAFORMA DE DISIPACIÓN

Con el objetivo de probar el diseño de la obra complementaria para mejoramiento de lavado en el margen izquierdo, se la construye en el modelo la cual es una terraza de hormigón con pendiente de 6% y talud 1:1, a lo largo de la parte posterior del azud. De la misma manera, se construye una plataforma de disipación a la sálida de las compuertas con una longitud de 20 cm (10 m), con un ancho igual al de la obra y a nivel de la entrada de las compuertas. *Ver foto 30.*

Foto 30. (Izquierda) Obra para mejoramiento de lavado en el margen izquierdo. (Derecha). Plataforma de disipación

Se realizaron varios ensayos con diferentes caudales que se describen a continuación en la Tabla 4.7.

CAUDALES DE LOS ENSAYOS MODELO CON ESTRUCTURA DE LAVADO EN EL MARGEN IZQUIERDO Y PLATAFORMA DE DISIPACIÓN					
h m (cm)	**h m (m)**	**B m (m)**	**Qm (lt/seg)**	**Qp (m3/seg)**	**Tasa de sedimentos (kg/s)**
1,7	0,017	1,1	4,96	87,82	0,05
3,5	0,035	1,1	14,16	250,67	0,05
4,1	0,041	1,1	17,75	314,12	0,05
1,2	0,012	1,1	2,97	52,57	0,05
1,5	0,015	1,1	4,13	73,06	0,05
1,2	0,012	1,1	2,97	52,57	0,05
1,55	0,0155	1,1	4,33	76,67	0,05
1,3	0,013	1,1	3,34	59,17	-
1,5	0,015	1,1	4,13	73,06	-

Tabla 4.7. Caudales ensayados con la obra de lavado del margen izquierdo y la plataforma de disipación

Además obtuvieron las velocidades originadas por el embalsamiento y las obras complementarias que se pueden ver en la Tabla 4.8:

VELOCIDADES									
		Margen derecho		**Franja Central**		**Margen izquierdo**		**Otra (Hacia el azud)**	
Qm (lt/seg)	**Qp (m3/seg)**	**Vm (m/seg)**	**Vp (m/seg)**	**Vm (m/seg)**	**Vp (m/seg)**	**Vm (m/seg)**	**Vp (m/seg)**	**Vm (m/seg)**	**Vp (m/seg)**
2.97	52,57	0,032	0,23	-	-	-	-	0,038	0,27
4.33	76,67	0,035	0,25	-	-	-	-	0,047	0,33

Tabla 4.8. Velocidades en la zona de embalse por efecto de la obra de lavado margen izquierdo

En la tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos para formas de lecho:

DUNAS Y ZONAS DE EROSIÓN Y SOCAVACIÓN							
Qp (m3/seg)	**ZONAS**	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**h m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (cm)**	**h p (cm)**
250,67	1	63	9	4.5	31.5	4.5	2,25
	2	138	25	10	69	12,5	5
	DUNAS	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**b2 m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (cm)**	**b2 p (cm)**
	1	160	38		80	19	
73,06	**ZONAS**	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**h m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (cm)**	**h p (cm)**
	1	40	10	7	20	5	3,5
	2	60	17	10	30	8,5	5
	DUNAS	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**b2 m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (m)**	**b2p (cm)**
	2	230	26	30	115	13	15
	3	240	18	30	120	9	15
76,67	**ZONAS**	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**h m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (cm)**	**h p (cm)**
	1	40	8	6	20	4	3
	2	60	12	7	30	6	3,5
	1	73	40	5	36,5	20	**2,5**
	2	50	100	7	25	50	3,5
	DUNAS	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**b2 m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (m)**	**b2p (cm)**
	1	230	70	0	115	35	0
	2	220	30	0	110	15	0
	3	200	40	0	100	20	0
59,17	**ZONAS**	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**h m (cm)**	**L p (m)**	**b 1p (cm)**	**h p (cm)**
	2	80	20	9	40	10	4,5

Tabla 4.9. Dunas y zonas de erosión y socavación por efecto de las obras complementarias

CAUDAL 50 m^3/ seg

- Con todas las compuertas abiertas, se observa una gran zona muerta provocada por el efecto de la terraza de lavado la ubicación de la zona que se mantiene a lo largo del margen izquierdo se amplía hasta la mitad del cauce .*Ver foto 31*

Foto 31. Zona muerta con caudal medio por efecto obra de lavado

- A pesar de presentarse ondulación en la superficie del agua, el calado en la zona de embalse no fue el necesario para permitir el desarrollo de dunas.

- Con embalse lleno y bocatoma abierta se mide las velocidades cuando se tienen carga sobre el azud 2 cm (1m) y se forma un vórtice horario frente a la bocatoma. *Ver foto 32.*

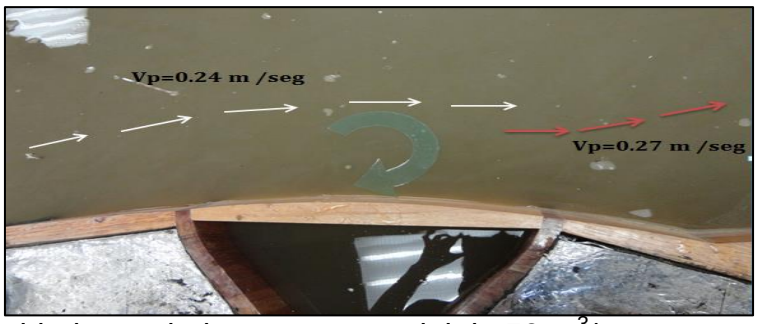


Foto 32. Velocidades embalse con un caudal de 50 m^3/seg con embalse lleno y terraza de lavado

- Con una tasa de transporte calibrada se observa que las compuertas 1 y 2 son las que trabajan, este caudal no provoca una fuerte erosión aguas abajo. Sin embargo cuando no envía sedimentos se produce erosión de material en la cola del embalse que posteriormente se depositará en la zona de embalse en forma de isla de sedimentos. *Ver foto 33.*

Foto 33. (Izquierda). Efecto del flujo a la sálida de las compuertas 1 y 2 con caudal formativo. (Derecha). Formación del frente de avance de sedimentos.

CAUDAL 75– 90 m^3/ seg

Antes de la prueba se nivela el cauce, se cubren los zonas, con sedimentos se recubren las obras adicionales.

- Al producir embalsamiento se puede visualizar líneas de corriente con diferentes sentidos uno antihorario en la parte posterior del azud, así como otro con el mismo sentido en la zona muerta y un flujo horario en el margen derecho frente a la bocatoma. *Ver foto 34*

- Se forma un vórtice horario a nivel de la bocatoma (se permite el paso hacia la tubería) y al abrir la compuerta de lavado se forma de igual manera un vórtice antihorario *Ver foto 34.*

Foto 34. (Izquierda). Formación de flujos horarios y antihorario durante el embalsamiento. (Derecha). Vórtice antihorario compuerta de lavado

- Con carga en el azud en el embalse se tienen dos flujos que tienen su origen en el zona 2, el primero se abre camino por la parte central del cauce y el segundo toma dirección hacia el margen izquierdo pero no alcanza la terraza de lavado. *Ver foto 35.*

Foto 35. Flujo preferencial con caudal 75 m^3/seg por efecto de la terraza de lavado

- Con compuertas cerradas, bocatoma abierta y carga en el azud que permite el paso de un caudal de 38 m^3/seg, las velocidades en el margen derecho y hacia el azud son las siguientes. *Ver foto 36.*

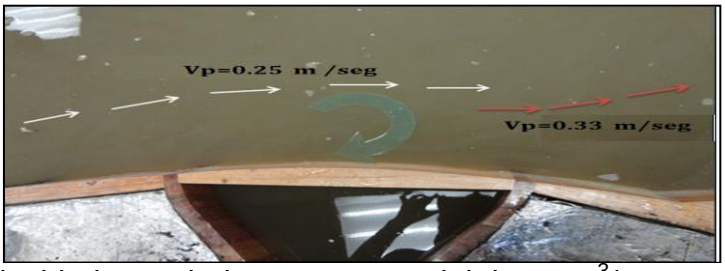


Foto 36.Velocidades embalse con un caudal de 75 m^3/seg con bocatoma abierta.

- Al abrir las compuertas, la corriente alcanza la terraza de lavado pero no lo suficiente para producir lavado pero la tendencia de depositación de material fino en el margen izquierdo se mantiene. *Ver foto 37.*

Foto 37. Zona de lavado y depositación de material fino sobre la terraza

- En la cola del embalse con todas las compuertas funcionando y la bocatoma cerrada la erosión en las zonas características (zona de erosión 1 y 2) se mantiene, siendo mayor en este último. La duna característica de esta zona se encuentra a lo largo y ancho del cauce se ha formado como consecuencia de un flujo lento.

- En la zona de embalse, la zona muerta se extiendo por efecto de la terraza de lavado, y las dunas en forma de abanico conservan la tendencia de que la duna del margen izquierdo se extiende en longitudes mayores y anchos menores que la del margen derecho por la mayor velocidad en desarrolla en la parte central, también se observa que no hay acumulación de sedimentos en forma de isla y no se produce azolvamiento del canal de lavado. *Ver foto 38.*

Foto 38. (Izquierda)Dunas en abanico y zona de sedimento fino caudal de 75-90 m^3/seg.
(Derecha). Zona de embalse con caudal de 75-90 m^3/seg por efecto de la terraza de lavado

- Al abrir la compuerta de lavado el efecto erosivo flujo que sale por la compuerta es aproximadamente de 80 cm (40m) pudiendo extenderse hasta 1 m (50m), lo cual provoca sedimentación en la parte central y hacia el margen derecho de la zona cóncava lo cual aumenta su cota. *Ver foto 36.* No se han formado dunas en la zona aguas abajo de la obra de captación.

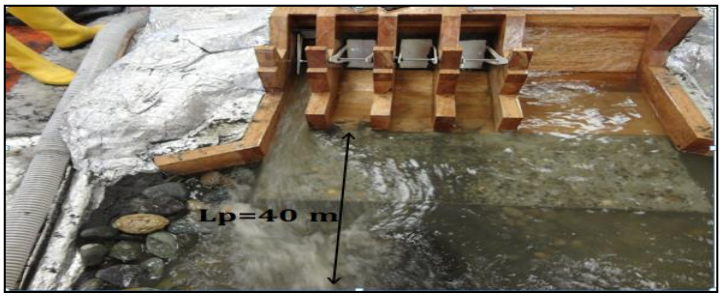


Foto 39. Influencia erosiva de la compuerta de lavado con Q= 75-90 m^3/seg

CAUDAL 250-300 m^3/ seg

- Al aumentar el caudal el material sedimentado sobre la terraza comienza a lavarse presentándose una forma de depositación en formas de escalones y su cota no alcanza la entrada de la bocatoma. *Ver foto 40.*

Foto 40. Lavado material fino sobre la terraza

- Las zonas de erosión 1 y 2 para estos caudales aumentan en ancho y longitud pero la profundidad de socavación disminuye en relación a la profundidad obtenida para caudales formativos. Para la fluvio morfología el zona 2 tiene un fuerte efecto erosivo formando olas de hasta 2.5 cm (1.25m).

- La dirección y sentido de las líneas de corriente durante el embalsamiento se mantiene igual que para caudales pequeños. Los flujos preferenciales cuando trabajan todas las compuertas se encuentra en la franja central del cauce y hacia el margen izquierdo. *Ver foto 41.*

Foto 41. Flujo preferencial con la obra de lavado
en el margen izquierdo para caudales de 250-300 m^3/seg

- Las dunas de abanico en el embalse no se han formado, han sido barridas por el aumento de caudal.

CAMBIO DE GEOMETRIA DE LAS PILAS

Para probar el nuevo diseño de las pilas, en el modelo se procedió a cambiar su geometría dándoles una forma triangular, se extiendo su base 9.64 cm (4.82m). Alrededor de la plataforma de disipación se ha colocado un lecho duro y muros que protejan los márgenes aguas abajo, se mantiene la obra de lavado en el margen izquierdo. *Ver foto 42.*

Foto 42. (Izquierda). Nueva geometría de las pilas.
(Derecha). Lecho duro y muros colocados aguas abajo de la obra

Los caudales ensayados en estas condiciones, se presentan a continuación en la Tabla 4.10:

CAUDALES DE LOS ENSAYOS CON CAMBIO EN LA GEOMETRIA DE LAS PILAS					
h m (cm)	**h m (m)**	**B m (m)**	**Qm (lt/seg)**	**Qp (m3/seg)**	**Tasa de sedimentos kg/s**
1,7	0,017	1,1	4,96	87,82	-
2,4	0,024	1,1	8,21	145,38	-
1,1	0,011	1,1	2,61	46,23	-
2,4	0,024	1,1	8,21	145,38	-
2,8	0,028	1,1	10,27	181,81	-
3,5	0,035	1,1	14,16	250,67	0,05
4,9	0,049	1,1	22,82	403,95	0,05
2,9	0,029	1,1	10,81	191,27	0,05
3,5	0,035	1,1	14,16	250,67	0,05
5,8	0,058	1,1	28,86	510,87	-

Tabla 4.10. Caudales ensayados con cambio de geometría de las pilas

Todos los ensayos se realizaron con carga en el azud y con un caudal de 30 m^3/seg circulando por la tubería, se obtuvieron las siguientes dimensiones en las zonas con estos caudales que se muestran en la Tabla 4.11.

ZONAS Y DUNAS							
Qp (m3/seg)	**ZONAS**	**L m(cm)**	**b m (cm)**	**h m (cm)**	**L p (m)**	**b p (m)**	**h p (cm)**
46.23 a 510,87	1	95	46	15	47,5	23	7,5
	2	155	35	18	77,5	17,5	9
	1	47	40	6	23,5	20	3
	2	100	50	6	50	25	3

Tabla 4.11. Dunas y zonas de erosión y socavación por efecto de las obras complementarias y cambio geometría de las pilas

CAUDAL 50 m^3/seg

- El cauce se nivela antes de la prueba, los flujos preferenciales cuando se agua está embalsada siguen la tendencia repetida hasta el momento... El material que se deposita en el embalse tiene un frente de avance en forma isla desde el margen derecho.

- Por procesos morfológicos aguas abajo se forma un frente de avance de sedimentos de forma escalonada desde el margen derecho.

- Aguas abajo en el cauce real se tiene una isla de sedimentos en el margen izquierdo, la cual se retiró en el modelo. Sin embargo con el tiempo esta isla se forma de manera natural en el modelo trasladándose en forma transversal hacia la parte central del cauce.

CAUDAL 88-145m^3/seg

- Se ha nivelado el cauce, se trabaja a embalse lleno y con la compuerta de la bocatoma abierta, el vórtice horario que se formaba en frente de la bocatoma se mantiene pero de forma oscilante y los vórtices de las pilas de las compuertas desaparecen.

CAUDAL 145-250 m^3/seg

- Los flujos preferenciales en la zona de embalse permanecen constantes. Los vórtices en las pilas no se forman por el cambio de geometría, sin embargo a la sálida de las compuertas hay presencia de vórtices en los muros lo cual podría eliminarse con un cambio en la geometría.

- El efecto erosivo debido a las compuertas aguas abajo se extiende unos 60 cm (30m).

CAUDAL de 250-400 m^3/seg

- Al abrir solo la compuerta de lavado la cola erosiva aguas abajo es de 70 cm (40 m). Luego se elevo el caudal hasta los 400 m^3/seg y se abrieron todas las compuertas al irse vaciando el embalse con un calado bajo poco profundo en la compuerta 3.

Una vez terminada la prueba se mide la socavación dejada por los caudales probados con la obra de lavado en el margen izquierdo.

- En la cola del embalse por el cambio constante de caudales, se pierde su capacidad de transporte, los sedimentos se depositaron aguas arriba, lo cual provoca un incremento del nivel del cauce. Por la constate elevación de caudales, la velocidad aumentan provocando que las dunas características del embalse sean barridas.

- Debido a la operación de las compuertas se ha nivelado con el sedimento fino y grueso en la zona de embalse. *Ver foto 43.*

Foto 43. Nivelación del sedimento fino y grueso en la zona de embalse

- Las zonas de erosión y zonas de socavación se han profundizado y alargado considerablemente. La erosión provocada por el retiró la plataforma de disipación, se extiende hasta 1m (50 m).

PISCINA DE DISIPACIÓN Y CAMBIO DE GEOMETRIA DE LAS PILAS SÁLIDA DE LAS COMPUERTAS

CAUDALES DE LOS ENSAYOS PISCINA DE DISIPACIÓN Y CAMBIO DE GEOMETRIA DE LAS PILAS SÁLIDA DE LAS COMPUERTAS					
h m (cm)	**h m (m)**	**B m (m)**	**Qm (lt/seg)**	**Qp (m3/seg)**	**Distancia dentellón (m) en prototipo**
2,1	0,021	1,1	6,76	119,67	37,5
1,5	0,015	1,1	4,13	73,06	52,5

AZUD					
Qp (m3/seg)	**H azud (cm)**	**H azud (m)**	**Qam (lt/seg)**	**Qap (m3/seg)**	**Abertura compuertas modelo (cm)**
119,67	2,6	0,026	3,13	55,42	
73,06	2,2	0,022	2,5	44,16	CL 2 cm
	1,4	0,014	1,33	23,45	CL 4cm
	1	0,01	0,82	14,47	CL 6 cm
	1,1	0,011	0,94	16,61	C1 2 cm
	0,3	0,003	0,14	2,47	C1 4 cm
	1,3	0,013	1,19	21,10	C3 2 cm
	5	0,05	7,17	126,82	

Tabla 4.12. Caudales de los ensayos con la piscina de disipación

Foto 44. Piscina de disipación y cambio de geometría de las pilas

Dentellón a 37,5 m (prototipo)

CAUDAL 120 m^3/seg

Con carga en el azud y compuertas cerradas:

- Aguas abajo la disipación de energía del azud se realiza en la piscina de disipación, se observa un flujo remolino con sentido horario.

Con carga en el azud y compuerta 1 abierta:

- Con un caudal de 55 m^3/seg circulando por el azud al abrir gradualmente la compuerta 1 se forma un momentáneamente un cresta de la ola de agua (fenómeno erosivo que puede destruir el hormigón circundante) con olas de 3 cm (1,5 m) y este cresta de la ola comienza al final del azud y se extiende una longitud 10 cm (5m), a medida que se abre la compuerta el cresta de la ola desaparece. El flujo preferencial aguas abajo es anti horario.

Con carga en el azud y compuertas 3 abierta:

- Dos flujos preferenciales se observan, uno con sentido horario hacia la derecha de la compuerta y otro con sentido antihorario a la izquierda hacia el azud La cresta de la ola tiene una altura 4,5 cm (2,25m). *Ver foto 45.*

Foto 45. (Izquierda) Cresta de la ola y flujo con la compuerta 1 abierta (Derecha). Flujos con la compuerta 3 abierta

Dentellón a 52,5 m (prototipo)

CAUDAL 75m^3/seg

Con carga en el azud y compuertas cerradas:

- Momentáneamente se desarrolla la cresta de la ola sin necesidad de abrir las compuertas. El flujo tiene sentido horario.

*Con carga en el azud y **compuerta de lavado** abierta 2 a 6 cm (1 a 3 m)*

- Al abrir gradualmente la compuerta se observa que la influencia erosiva aguas abajo afecta el margen derecho desde 1,25 a 1,45m (62 a 72 m) con caudales en el azud de 44 a 15 m^3/seg respectivamente

- El flujo tiene sentido antihorario aguas abajo afectando el frente de las compuertas y el azud. Bajo estas condiciones se forma la cresta de la ola en un corto lapso de tiempo llegando a alcanzar una altura de 3,5 cm (1,75 m) y longitud de 8,5 cm (4,25 m) para aberturas mayores.

*Sin carga en el azud y **compuerta de lavado** abierta de 8 a 10 cm (4 a 5 m):*

- La influencia de la compuerta aguas abajo disminuye desde 1.5 m (75 m) a 1,35 (47,5m) la cola se desarrolla en una longitud mayor a la longitud de la piscina.

- El flujo es antihorario, a pesar de no tener la influencia del flujo producido por el azud, se forma un vórtice antihorario permanente en la pila de ingreso de la compuerta.

*Con carga en el azud y **compuerta 1** abierta 2 a 6 cm (1 a 3 m):*

- El caudal que pasa por el azud va desde 17 a 3 m^3 / seg con mayor abertura de la compuertas, la influencia erosiva se extiende desde 1,2 a 1,4 m (60 a 70 m), la erosión es controlada fuera de la piscina.

- En la piscina el flujo preferencial se mueve hacia el azud con sentido antihorario. La cresta de la ola se forma por un mayor lapso de tiempo que va desde los 2 min (14 min) a pocos segundos conforme se abre la compuerta, la ola tiene una altura de 2 cm (1m) y un ancho de 5 cm (2,5 m).

- Aguas abajo de la piscina, se produce erosión, se ha lavado el material más fino. Se producen vórtices antihorario de 1 cm (0,5 m) de diámetro de manera momentánea entre las pilas de esta compuerta.

- Cuando la compuerta se abre en su totalidad **no se tiene carga en el azud** la distancia erosiva disminuye a 50 cm (25 m), la disipación se da dentro de la piscina, no hay efecto erosivo aguas abajo. En la zona del embalse, detrás del azud existe un flujo antihorario.

*Con carga en el azud y **compuerta 3** abierta 2 a 6 cm (1 a 3m):*

- La cola de influencia erosiva aguas abajo va desde de 1,2 a 1,3m (60 a 65 m) debido al aumento gradual de la abertura de la compuerta.

- En estas condiciones se producen dos flujos, uno en sentido antihorario hacia la izquierda y otro horario hacia la derecha de la compuerta.

- Al abrir en su totalidad la compuerta, no hay carga en el azud y la influencia de la compuerta es de 1,4 m (70 m).

*Sin carga en el azud y **todas las compuertas** abiertas 2 a 4 cm (1 a 2m).*

- El flujo tiene sentido antihorario y la longitud erosiva aumenta de 0,6 a 1,2 m (30 a 60 m), la disipación con aberturas mayores a 2 cm (1m) se realiza fuera de la piscina por lo que existe erosión y lavado de material fino que circunda el hormigón de la piscina.

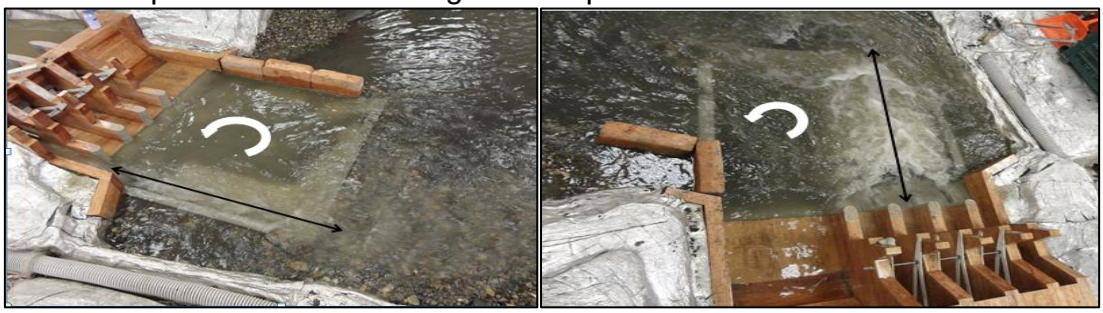


Foto 46. (Izquierda). Flujo e influencia erosiva compuerta de lavado. (Derecha). Flujo e influencia erosiva de todas las compuertas

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

PERFIL LONGITUDINAL:

- Las pendientes, velocidades tienen una estrecha relación con la variación del perfil longitudinal en el modelo a escala reducida, se ha encontrado una disminución gradual de la pendiente desde la cola del embalse, hasta la entrada de las compuertas, la profundidad del calado en las secciones de control aumenta gradualmente es decir se ha observado que a caudales mayores las profundidades son menores y las velocidades aumentan favoreciendo la erosión en las zonas más altas(cola del embalse) y depositación en las zonas con pendientes más bajas(embalse). En el anexo A.1 se ven los resultados obtenidos en las secciones de control.

EROSIÓN LOCAL EN LAS PILAS

- Se ha observado que el flujo preferencial al entrar a la zona del embalse tiene su origen en el zona de erosión 2 y se extiende hacia el margen central del cauce con dirección hacia las compuertas 2 y 3 que al no estar alineadas con la dirección de la corriente ocasiona el choque del flujo en las pilas con un ángulo de ataque que favorece la formación de

vórtices en herradura y superficiales dando como resultado el foso de erosión (zona de socavación 1), sin embargo la magnitud de éste depende del calado del flujo, se ha podido observar una reducción en el foso de erosión cuando el calado en la zona de embalse es bajo debido a la operación de las compuertas(abertura).

- Con el cambio de geometría en las pilas de una forma cilíndrica a una forma elíptica en la nariz y dándole una forma transversal triangular, se ha logrado la no formación de vórtices superficiales y la reducción el tamaño del foso de erosión de las pilas, en la *el anexo A.2. se observa* que la longitud, ancho y la profundidad de socavación se reduce al tener una menor área de ataque. Se puede concluir que la geometría de las pilas afecta de forma directa a la erosión por lo cual deben ser diseñadas con forma dinámica y lo mas alineadas posibles a la dirección de la corriente.

FORMAS DE LECHO

- Se puede concluir que las formas del lecho intervienen decisivamente en la resistencia del flujo (rugosidad) y participan en el transporte de sedimentos, en los ensayos las formas más comunes que se presentan son los rizos y dunas, lo primeros se forman a etapas tempranas en el lecho con alturas de orden de milímetros cuya visualización en el modelo es compleja que no fueron tomados en cuenta, mientras que las dunas desarrolladas en el lecho se forman a velocidades bajas (régimen lento).

- La profundidad del calado tiene influencia directa sobre su altura. Se ha observado que las formas del lecho tiende a desaparecer al aumentar el caudal presentándose en algunas ocasiones un lecho plano.

- Como resultado de los ensayos se ha podido establecer que el flujo a la entrada de la zona de embalse, en el margen derecho (curva); se extiende en forma de abanico aluvial que se origina cuando una corriente de agua fluye rápidamente y entra en una zona más tendida lo que provoca una disminución de velocidad de este flujo en abanico se desprenden dos ramales que ocasionan la formación de dos dunas, una hacia el margen derecho y otra hacia la parte central, probablemente porque las velocidades a lo ancho del cauce no son uniformes. *Ver anexo A.4.1*

- Se ha logrado identificar que al inicio del abanico aluvial se depositan el material más grueso sedimentándose en la parte final el material más fino.

FLUJO PREFERENCIAL Y ZONAS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN

- Independientemente del caudal enviado en el modelo y sin la influencia de la estructura, se ha podido establecer que en el cauce existe zonas de socavación permanente , la zona de erosión 1, ubicado en el margen izquierdo en la cola del embalse se forma debido a la configuración topográfica que origina un choque del flujo generando una gran turbulencia erosionando en forma local el sector para luego ser redireccionado en forma transversal hacia el margen derecho ocasionando otra zona de socavación ubicada justo al final de la cola del embalse, al estar ubicado en una zona de estrechamiento y entrada a una curva (zona de erosión 2) esta zona se ha replicado de las misma manera que en el cauce real. Luego el flujo erosiona el margen izquierdo del cauce generando una última zona de socavación (Zona de socavación 1) por configuración topográfica que se puede observar en la Fig 4.1. Finalmente la corriente entra en la zona cóncava donde existe un ensanchamiento del cauce favoreciendo la sedimentación.

- Al emplazar la estructura se ha observado que el comportamiento flujo antes mencionado en el lugar de embalsamiento cambia, debido a la disminución de velocidad se provoca el azolvamiento del Zona 3 en el margen izquierdo, por el flujo preferencial hacia las compuertas 2 y 3 que origino una nueva zona (zona de socavación 1).

- La distribución de las velocidades en el embalse no es uniforme se inicia con valores bajos en el margen derecho para aumentar de forma gradual hasta el margen central y luego disminuir lo cual provoca un movimiento ligero en el margen izquierdo. Se ha establecido que embalse lleno se obtienen las velocidades más bajas en comparación con los distintos mecanismos de funcionamiento de las compuertas. *Ver anexo A.4*

- Se ha establecido que debido a la configuración morfológica y topográfica del cauce en el embalse independiente del caudal se da lugar a la formación de unas zona muerta (baja velocidad) en el margen izquierdo, el flujo preferencial no se extiende hasta esta zona, ocasionando la depositación de material más fino.

- Aguas abajo de la estructura, la condición más crítica se presenta cuando se abre únicamente la compuerta de lavado debido a que esta tiene una cola de influencia erosiva 0,80 m (40 m), la cual se extiende a longitudes mayores sin presencia de un disipador, afectando en forma directa el margen derecho lo que provoca una fuerte erosión y desestabilización del muro colocado en este margen.

- Se ha observado que aguas abajo por procesos morfológicos se forma una isla de sedimentos en el margen izquierdo la cual se retiro en el modelo pero con el tiempo se forma de manera natural trasladándose transversalmente hacia el margen central del cauce.

- La cota de sedimentos en la entrada de la bocatoma permanece estable a 2,5 cm (1,25m), es decir independientemente del caudal esta cota no aumenta.

- La colocación de una piscina de disipación agua abajo de la obra, nos permite la visualización del comportamiento del flujo que pasa por las compuertas bajo diferentes mecanismos de funcionamiento de las mismas, al enviar un carga sobre el azud el flujo viene a comportarse de una forma horario, al abrir la compuerta 3 tiende a formar dos tipos de flujo, uno horario hacia la derecha y otro anti-horario hacia la izquierda, durante los primeros minutos luego de abrir alguna compuerta en la sálida del colchón de aguas del azud se forma un cresta de la ola que es fenómeno con capacidad erosiva.

- La terraza de lavado colocada en el margen izquierdo en la zona de embalse, no mejora el efecto de lavado, se mantiene la tendencia de depositación de material fino, no se requiere esta obra complementaria porque el material ubicado en ese margen se lava en forma natural por el comportamiento morfológico del río.

- Pese a probar distintas formas de disipación la morfología aguas abajo (cuencos y piscina de disipación), sufre una fuerte erosión el cual podría ser reducido controlando la velocidad de salida de las compuertas o mediante una profundización del cuenco disipador.

- Al estar completamente lleno el embalse la dirección de flujo que presenta es el embalse es anti horario en la zona atrás del azud y en la zona muerta mientras a la entrada de la bocatoma y margen derecho el sentido es horario.

- Al haberse mantenido una tasa de sedimento constante en todos los ensayos, los caudales para los cuales tasas de transporte no sean suficientes para mantener el equilibrio en el río, produjeron el levantamiento de material que será arrastrado aguas hasta ser depositado en zonas donde las condiciones favorezcan el proceso de sedimentación.

- Es recomendable la colocación de un cuenco disipador aguas abajo de la estructura debido al gran efecto erosivo que produce al momento de abrir las compuertas en sus distintas combinaciones, lo que conlleva a la formación de una isla de sedimentos de 1 m (50m) aproximadamente.

- Pese a que la teoría recomienda que no se emplace la obra en el margen interior de la curva donde se tiene tendencia a la sedimentación, debido a condiciones geológicas del río, está fue emplazada en el margen interior de la curva donde se ha observado que material se deposita a la sálida de la bocatoma formando una especie de isla de sedimentos.

- El resultado de las tasa de Meyer-Peter ha establecido valores sobrestimados de las tasa de equilibrio produciendo un acumulación de material y una configuración del cauce con una pendiente longitudinal muy menor a la esperada. , mientras que la tasa de Van Rijn da como resultado valores subestimados lo que provoco efectos de erosión, y finalmente las tasas de formulación de Nielsen cuyos resultados fueron más adecuados desde el punto de vista de reproducir un cauce en equilibrio y pendiente longitudinal esperada. Ver Tabla 4.2.

BIBLIOGRAFIA

Beltrán, J., & Ordoñes, D. (2012). *Estudio para estableciemiento de tasa de arrastre de fondo para el proyecto de generación hidroelectrica HIDROSANBARTOLO mediante modelo fisico de lecho movil. Universida de Cuenca.*

Bertram, A. (2001). *Erosión en estribos y pilas de puentes(Primera.p.53).* Grupo de Investigacion de Transporte de Sedimentos (GITS).

CEDEX. (2000). V Jornadas sobre Encauzamientos Fluviales(p. 120). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid.

Chanson, H. (2004). *Hidraulica de Flujos en Canales Abiertos* (Segunda p. 560 ed.). McGraw-Hill.

DUARTE, C., & NIÑO, J. (2004). *Introducción a la Mecanica de Fluidos.(p.100) Universidad de Colombia.* Colombia.

Galiano, L., & Toapaxi, J. (2010). *Analisis de la Socavacion de Cauces Naturales (Primera p.60).*

Gracia Sánchez, J. (1997). Sedimentación en Embalses (P.256) Manual de ingenieria de rios. Instituto de Ingeniería. UNAM.

Gracia Sánchez, J., & Maza Álvarez, J. A. (1997). Manual de Ingenieria de ríos.(p.60) Instituto de Ingeniería (UNAM). Mexico.

Leopold, L. B., Gordon, W., & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology (Primera. P.632).* EEUU: Dover Publications.

Martin Vide, J. P. (2003). *Ingenieria de Rios (Primera p.338).* España: ALFAOMEGA.

Pacheco, E., & Carrillo, V. (2012 a). *"Estudio en modelo Hidraulico para la optimizacion del diseño de la obra de captacion en el rio Negro de proyecto hidroelectrico San Bartolo. Programa para el Manejo del Agua y el Suelo PROMAS Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador (p. 33).*

Pizarro, H., & Murillo, R. (1992). *Principios Hidraulicos.* Convenio de IICA-SENARA, II ETAPA DE PROYECTO DE RIEGO ARENAL- TEMPISTE, Venezuela.

Rocha Felices, A. (1998). *Introducción a la Hidraulica Fluvial. U.N. de I. Facultad de Ingeniería (Primera. p.285).* Lima.

Simon Elliott, M. (2010). *El Rio y la Forma (Primera. P.89).* Chile: Ril Editores.

Universidad de Zaragoza. (2004). Morfología y Dinámica Fluvial (Primera .p. 62).

Universidad del Cauca. (2003). *Morfologia Fluvial (Primera. p.58). Obras de Control Fluvial.*

Universidad del Cauca. (2003). *Procesos Fluviales(Primera.p.58). Obras de Control Fluvial.*

ANEXOS

A1. PERFILES LONGITUDINAL Y SECCIONES DE CONTROL.

A.1.1 Calados y velocidades en las secciones de control de la cola del embalse

Prototipo				
Sección	**h (m)**	**b (m)**	**V (m/seg)**	**Qp (m3/seg)**
1	0,65	46	3,46	**103,4**
2	0,95	28	3,89	
3	1,05	43,25	2,28	
1	0,8	46	1,43	**52,3**
2	1,1	28	1,71	
3	1,45	43,25	0,84	
1	0,85	46	1,34	**34,3**
2	1	43,25	1,22	
3	1,25	28	1,50	

Tabla A.1. Calados y velocidades en las secciones de control de la cola del embalse

A.1.2. Colocación de Secciones y zonas afectadas.

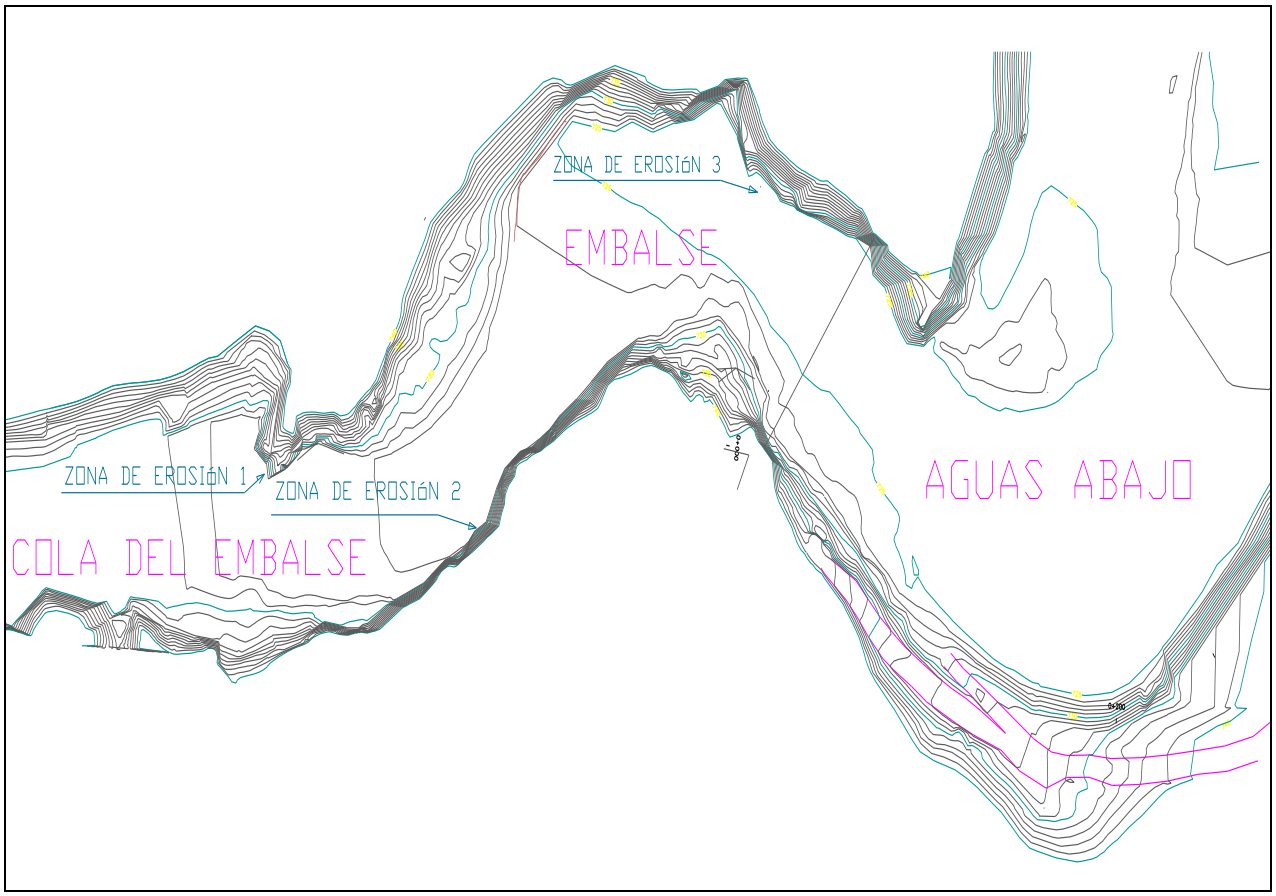


Fig A.1. Esquema de ubicación de las secciones de control en la cola del embalse.

A2.RESULTADOS DE LA EROSION LOCAL EN LAS PILAS DE LAS COMPUERTAS

A.2.1 Comparación del foso de erosión de las pilas sin y con cambio de geometría de las pilas

Qp (m3/seg)	L m(cm)	b m (cm)	h m (cm)	L p (m)	b p (m)	h p (cm)	Condición
180	91	16	5	45,5	8	2,5	Con muros y lecho rocoso aguas abajo. **sin cambio de geometría de las pilas**
59 a 210	160	15	3.6	80	7.5	1,8	Muro de grava. **sin cambio de geometría de las pilas**
303,29	67	27	4	33,5	13.5	2	Con compuertas abiertas sin carga azud, **sin cambio de geometría de las pilas**
76.67	73	40	5	36,5	20	2,5	Terraza de lavado, plataforma embalse lleno y carga azud **sin cambio en la geometría de las pilas**
46,23 a 501	47	40	6	23,5	20	3	Condiciones anteriores y **cambio de geometría de las pilas**

Tabla A.2. Comparación del foso de erosión de las pilas sin y con cambio de geometría de las pilas

A3. ESQUEMA DE FORMAS DE LECHO Y RESULTADOS.

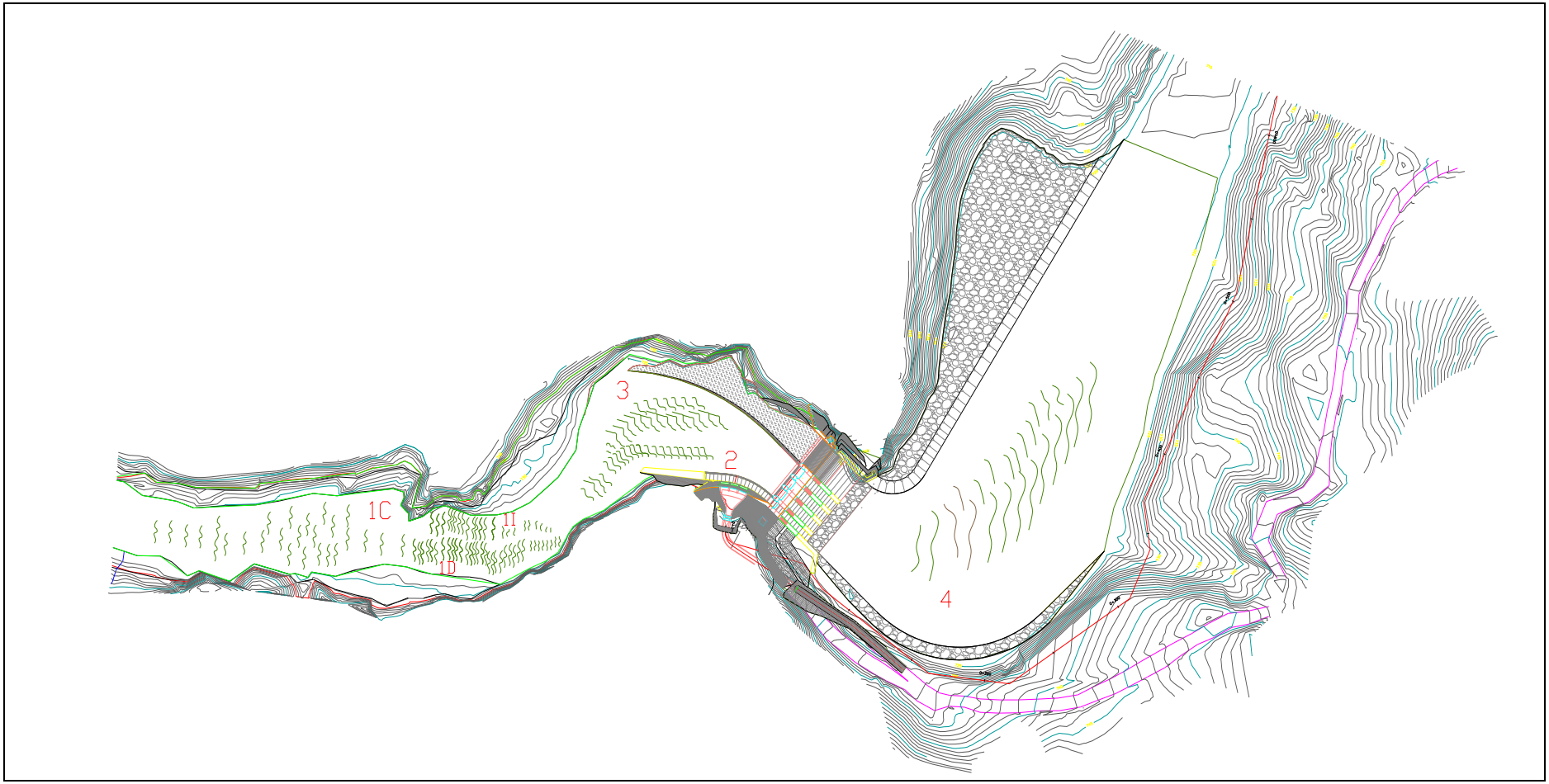
A.3.1 Formas de lecho (dunas) formadas en el cauce con los diferentes caudales.

CAUDALES CON SUS RESPECTIVO FORMAS DE LECHO.FORMAS DEL LECHO								
Qp (m3/seg)	**DUNAS**	**L m(cm)**	**b 1m (cm)**	**b2 m (cm)**	**L p (m)**	**b 1m (m)**	**b2 m (m)**	**Condición**
75	1	170	20		85	10	0	Bocatoma abierta, carga azud, compuertas abiertas
	2	140	43	22	70	21.5	11	
180 a 45	1 D Mitad embalse	190	30	40	95	15	20	Muro de grava en el embalse (margen izquierdo) sin cambio de geometría de las pilas
	1 I mitad embalse	162	20	48	81	10	24	
	1C	160	48	82	80	24	41	
	2	300	34		150	17	0	
50 a 210	2	240	83		120	41.5		
88	1	290	50		145	25		
	2	150	25		75	12.5		
	3	120	47		60	23.5		
180	1	280	40		140	20		
	2	170	37		85	18.5		
	3	190	45		95	22.5		
170	1	230	32		115	16		
	2	140	40		70	20		
	3	190	40		95	20		
303.29	1	130	30		65	15		Con compuertas abiertas sin carga azud, sin cambio de geometría de las pilas
	2	110	30		55	15		
	3	100	50		50	25		
	4D	230	50		115	25		
	4I	140	180		70	90		
250.67	1	160	38		80	19		Terraza

73.06	2	230	26	30	115	13	15	de lavado, plataforma disipación, embalse lleno, carga en el azud, sin cambio de geometría de pilas
	3	240	18	30	120	9	15	
76.67	1	230	70		115	35		Condiciones anteriores con cambio de geometría de las pilas
	2	220	30		110	15		
	3	200	40		100	20		
59.17	2	80	20	9	40	10	4.5	

Tabla A.3. Formas de lecho (dunas) formadas en el cauce con los diferentes caudales.

A3.2 FORMAS DEL LECHO



A.4.VELOCIDAD Y FLUJO PREFERENCIAL

A.4.1 Caudales en varias condiciones.

Q(m3/s)	Embalse lleno	Compuertas abiertas
	Vp (m/s)	Vp(m/s)
50-90	0,1-0,25	2,9
90-120	0,25-0,43	**3,2**
120-140	0,43-0,49	3,7
140 - 180	0,49 - 0,66	4,7
180 - 230	0,66 - 0,94	**4,9**
230 - 400	0,94 - 1,24	5,9

Tabla A.4. Caudales en varias condiciones.

A.4.2. FLUJO PREFERENCIAL EN LA ZONA DEL EMBALSE