



RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo la evaluación, a través de un estudio en modelo físico a escala reducida, del desempeño hidráulico desde el punto de vista de procesos de flujo y de carga de sedimentos en suspensión que podrían afectar a la obra de captación en el río Negro del proyecto de generación hidroeléctrica HIDROSANBARTOLO. De acuerdo al funcionamiento de la bocatoma se ha establecido que en el embalse se producen cuatro zonas claramente diferenciadas en las que se presentan velocidades (en prototipo) que van desde 0.1 a 1.20m/s según se operen o no las compuertas dispuestas para lavado y control de crecidas. Además se ha registrado la formación de vórtices en las pilas y frente a la captación, determinándose que los primeros son causa de la arquitectura originalmente planteada para el diseño, mientras que los segundos se deben al nivel de sumergencia preestablecido para la bocatoma. Con respecto a la concentración de sedimentos en suspensión se analizaron las relaciones entre las concentraciones aguas arriba del embalse, en el embalse y en la bocatoma, conjuntamente con la información recopilada en el río, estableciéndose que la concentración del sedimento en suspensión disminuye en relación con la concentración aguas arriba del embalse, mientras que las concentraciones del embalse y de la captación fueron prácticamente las mismas, identificándose cambios o alteraciones debidas a la operación de las compuertas. Finalmente se ha determinado, que el material susceptible de entrar a la conducción tendría un diámetro de 0.255mm (escala de prototipo) formado principalmente por arena fina.

El estudio se constituye en un importante aporte a los trabajos de optimización del diseño de la captación del Proyecto y se da un importante aporte al estudio y mejor entendimiento de los procesos de flujo relacionados a carga y transporte de sedimento en suspensión.

Palabras clave: Diseño de Bocatoma, Modelo físico de escala reducida, Sedimento en suspensión.



CONTENIDO

Lista de Símbolos.....	10
Lista de Figuras.....	12
Lista de Tablas.....	14
Dedicatoria.....	15
Agradecimiento.....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 ANTECEDENTES.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 GENERAL.....	17
1.2.2 ESPECIFICOS.....	17
1.3 ALCANCE.....	18
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	18
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 PROCESOS DE FLUJO Y DE SEDIMENTOS EN OBRAS HIDRÁULICAS: CASO DE ESTUDIO DE UNA CAPTACIÓN.....	19
2.1.1 GENERALIDADES.....	19
2.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS.....	19
2.1.3 OTRAS PROPIEDADES RELACIONADOS A LOS SEDIMENTOS.....	23
2.1.4 MOVIMIENTO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTO.....	23
2.1.5 ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS RELACIONADOS A OBRAS DE CAPTACIÓN.....	28
2.2 MODELACIÓN FÍSICA. HIDRÁULICA DE LECHO MÓVIL.....	40
2.2.1 INTRODUCCIÓN.....	40
2.2.2 MODELOS FLUVIALES DE LECHO MOVIL.....	42
3. MATERIALES Y METODOS.....	43
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	43
3.2 DESCRIPCION DEL AREA DEL PROYECTO.....	43
3.2.1 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LA ZONA.....	44



3.2.2	UBICACIÓN DE LA BOCATOMA.....	45
3.3	CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MODELAMIENTO DE LA OBRA DE CAPTACIÓN EN EL RÍO NEGRO	45
3.3.1	CONSIDERACIONES DE HIDROLOGIA FLUVIAL PARA EL MODELO ..	45
3.3.2	CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL MODELO.....	45
3.4	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO FÍSICO DE ESCALA REDUCIDA.....	46
3.4.1	ESCALAMIENTO LONGITUDINAL	46
3.4.2	ESCALAMIENTO DEL CAUDAL	47
3.4.3	ESCALAMIENTO DEL HIDROGRAMA	47
3.4.4	ESCALAMIENTO DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS PARA EL MODELO.....	48
3.4.5	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	49
3.4.6	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	50
3.4.7	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	51
3.5	EQUIPOS Y LABORATORIO.....	51
3.5.1	EQUIPO COMPLEMENTARIO.....	53
3.6	MÉTODOS.....	55
3.6.1	CÁLCULO DE LA CARGA DE SEDIMENTO	55
3.6.2	CRITERIOS DE INICIO DE SUSPENSIÓN.....	56
3.6.3	MEDICIÓN DEL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN	56
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	58
4.1	COMPORTAMIENTO DE LA CAPTACIÓN	58
4.1.1	CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL DESEMPEÑO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ASOCIADAS A LA BOCATOMA	58
4.1.2	PARÁMETROS DE FLUJO	58
4.1.3	ANÁLISIS DE VÓRTICES	64
4.1.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE ACUMULACIÓN DE MATERIAL EN LA BOCATOMA.....	68
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN	70
4.2.1	TURBIEDAD Y CONCENTRACIONES MEDIDAS.....	70



UNIVERSIDAD DE CUENCA

4.2.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS	74
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
6. REFERENCIAS	84
ANEXOS	87
Anexo A1 – Planos de Diseño de la Bocatoma.....	88
Anexo A2 – Planos de Rediseño de la Bocatoma.....	89
Anexo A3 – Expresiones para determinar la profundidad de sumergencia en captaciones profundas.....	90



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Marco Fabián Anguisaca Mejía, 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.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marco Fabián Anguisaca Mejía'.

Marco Fabián Anguisaca Mejía
0104810809

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Marco Fabián Anguisaca Mejía, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Marco Fabián Anguisaca Mejía".

Marco Fabián Anguisaca Mejía
0104810809

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Andrés Xavier Maza Mogrovejo, 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.



Andrés Xavier Maza Mogrovejo
0104827282

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Andrés Xavier Maza Mogrovejo, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.


Andrés Xavier Maza Mogrovejo
0104827282

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca

**ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE FLUJO EN UNA OBRA DE CAPTACIÓN
MEDIANTE EXPERIMENTACION EN UN MODELO FISICO DE ESCALA REDUCIDA.
ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROSANBARTOLO**

Director:
Ing. MSc. Agustín Rengel Barrera

Tesis previa a la obtención
del Título de Ingeniero Civil

Tutor:
Ing. MSc. Esteban A. Pacheco Tobar

Autor:
**Marco Fabián Anguisaca Mejía
Andrés Xavier Maza Mogrovejo**

Cuenca - Ecuador
Octubre 2012



Lista de Símbolos

La siguiente lista ofrece una visión general de los símbolos utilizados en el texto.

Propiedades físicas de las partículas

s	<i>densidad relativa de la partícula</i>
ρ_s	<i>densidad de la partícula</i>
ρ	<i>densidad del fluido</i>
d_s	<i>diámetro del sedimento</i>
S	<i>coeficiente de distribución</i>
σ_g	<i>desviación estándar geométrica basada en una distribución log-normal de tamaños de grano</i>
w_o	<i>velocidad de sedimentación de la partícula</i>
C_d	<i>coeficiente de arrastre</i>
μ	<i>viscosidad dinámica del fluido</i>
w_s	<i>velocidad de caída de una suspensión</i>
C_s	<i>concentración volumétrica de sedimentos</i>
V	<i>velocidad media del flujo</i>
D_H	<i>diámetro hidráulico</i>
θ	<i>pendiente del lecho</i>
ν	<i>viscosidad cinemática del fluido</i>
g	<i>aceleración de la gravedad 9.81 m/s²</i>
V^*	<i>velocidad de corte</i>
τ_o	<i>esfuerzo cortante del lecho</i>
Re	<i>número de Reynolds</i>
Re^*	<i>número Reynolds de corte</i>
τ_*	<i>parámetro de estabilidad o parámetro de Shields</i>
$(\tau_*)_c$	<i>parámetro crítico de Shields para el inicio de la carga de lecho</i>
R	<i>peso específico de los granos</i>
D	<i>diámetro medio de los granos</i>
SSC	<i>concentración de sólidos suspendidos</i>
T	<i>turbiedad</i>

Movimiento y transporte de sedimento en suspensión

c_s	<i>concentración de sedimentos a una altura y del lecho</i>
$(C_s)_{y=y_s}$	<i>concentración de sedimentos a la distancia y_s del fondo</i>
K	<i>constante de von Karman ($K = 0.4$)</i>
Z	<i>número de Rouse o parámetro característico de la suspensión</i>
q_s	<i>tasa de transporte volumétrica de carga en suspensión por unidad</i>
de	



UNIVERSIDAD DE CUENCA

	<i>ancho</i>
<i>d</i>	<i>profundidad de flujo</i>
δs	<i>espesor de la capa de carga de lecho</i>

Bifurcaciones

<i>Q</i>	<i>gasto líquido del cauce principal</i>
<i>Q₁</i>	<i>gasto líquido del canal lateral</i>
<i>Q₂</i>	<i>gasto líquido remanente en el río</i>
<i>Q_F</i>	<i>gasto sólido total en el cauce principal</i>
<i>Q_{F1}</i>	<i>gasto sólido que ingresa al canal lateral</i>
<i>Q_{F2}</i>	<i>gasto sólido remanente</i>
<i>Q₁/Q</i>	<i>relación de toma</i>
<i>Q_{F1}/Q_F</i>	<i>relación de sólidos</i>
<i>b_h</i>	<i>ancho de separación</i>
<i>α</i>	<i>número de Rouse reemplazando K por el valor de Karman</i>

Relaciones y factores de escala

<i>L_r</i>	<i>escala de longitud</i>
<i>V_r</i>	<i>escala de velocidad</i>
<i>F_r</i>	<i>escala de fuerza</i>
<i>M_r</i>	<i>escala de masa</i>
<i>t_r</i>	<i>escala de tiempo</i>
<i>Q_r</i>	<i>escala de caudal</i>
<i>P_r</i>	<i>escala de presión</i>
<i>Fr_p</i>	<i>número de froude del prototipo</i>
<i>Fr_m</i>	<i>número de froude del modelo</i>
<i>Fr_p = Fr_m</i>	<i>relación de Froude</i>
<i>L_p</i>	<i>longitud prototipo</i>
<i>L_m</i>	<i>longitud modelo</i>
<i>V_p</i>	<i>velocidad prototipo</i>
<i>V_m</i>	<i>velocidad modelo</i>
<i>V_{S_m}</i>	<i>velocidad de asentamiento para el modelo</i>
<i>V_{S_p}</i>	<i>velocidad de asentamiento para el prototipo</i>



Lista de Figuras

Figura 2.1. Fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento (Chanson, 2002) ...	24
Figura 2.2. Distribución vertical de concentraciones (Rocha Felices, 1998)	26
Figura 2.3. Distribución vertical de concentraciones en función del diámetro de las partículas (Rocha Felices, 1998).....	27
Figura 2.4. Esquema para flujos cargados de sedimentos (Chanson, 2002)	28
Figura 2.5. Partes de una bocatoma	29
Figura 2.6. Ubicación de la toma en tramos curvos (Mansen Valderrama, 2011)	32
Figura 2.7. Representación esquemática de una bifurcación (Rocha Felices, 1978)....	35
Figura 2.8. Líneas de separación (Rocha Felices, 1978)	38
Figura 2.9. Relación entre Q_{F1}/Q_F y Q_1/Q en función del parámetro adimensional α (Rocha Felices, 1978)	39
Figura 3.1. Localización del Proyecto Hidrosanbartolo	43
Figura 3.2. Geología general de la Zona del Proyecto (Pacheco & Carrillo, 2012a)	44
Figura 3.3. Esquema Geomorfológico (Pacheco & Carrillo, 2012a)	44
Figura 3.4. Hidrograma del río Negro para un período de retorno de 100 años.....	48
Figura 3.5. Elementos de la Bocatoma	51
Figura 3.6. Bomba del laboratorio del PROMAS	52
Figura 3.7. Turbidímetro	53
Figura 3.8. Serie de Tamices	54
Figura 3.9. Hidrómetro	55
Figura 3.10. Puntos de recolección de las muestras en el modelo	56
Figura 4.1. Relación de la velocidad frente a la toma en función del caudal	60
Figura 4.2. Zonas de flujo preferencial en el embalse.....	60
Figura 4.3. Flujo preferencial detrás de las compuertas.....	61
Figura 4.4. Distribución de velocidades para un caudal de $191 \text{ m}^3/\text{s}$	62
Figura 4.5. Velocidad máxima con funcionamiento de las compuertas.....	62
Figura 4.6. Distribución de velocidades para un caudal de $403 \text{ m}^3/\text{s}$	63
Figura 4.7. Tipos de Vórtices según Alden Research Laboratory (Makusa & Kiviniemi, 2009)	64
Figura 4.8. Formación de vórtices alrededor de las pilas	65
Figura 4.9. Vórtices Intermitentes en las pilas con el rediseño	65
Figura 4.10. Profundidad sumergida en una captación (Makusa & Kiviniemi, 2009)	66
Figura 4.11. Variación de la profundidad de sumergencia en función de la abertura de la compuerta	66
Figura 4.12. Vórtices frente a la bocatoma.....	67



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4.13. Azolvamiento en canal de lavado y elevación del lecho	68
Figura 4.14. Material sedimentado en la captación	69
Figura 4.15. Variación de la turbiedad en función del caudal.....	71
Figura 4.16. Variación de la concentración de sedimentos en la captación y en la tubería	71
Figura 4.17. Distribución de concentraciones de sedimentos frente a la captación	72
Figura 4.18. Relación de tasas de sedimento en suspensión en la cola del embalse, en el embalse y la captación	74
Figura 4.19. Granulometría del material de la captación (Muestra 2, Figura 3.10)	74
Figura 4.20. Granulometría del material bajo la captación (Muestra 3, Figura 3.10).....	75
Figura 4.21. Granulometría del material de las turbinas (Muestra 4, Figura 3.10)	75
Figura 4.22. Granulometría río Negro y material obtenido en el modelo.....	77



Lista de Tablas

Tabla 3.1. Caudales medios mensuales en los sitios de toma del aprovechamiento Copal - San Bartolo (Pacheco & Carrillo, 2012a)	45
Tabla 3.2. Tasas de transporte de sedimento calculadas según el criterio de Nielsen (Beltrán & Ordóñez, 2012)	55
Tabla 3.3. Relaciones entre Turbiedad y SSC (Pacheco, 2008)	57
Tabla 4.1. Coeficientes de descarga	58
Tabla 4.2. Velocidades para modelo y prototipo con compuertas cerradas	59
Tabla 4.3. Velocidades para modelo y prototipo con compuertas abiertas	59
Tabla 4.4. Tasa de sedimentos en suspensión en la captación y en las turbinas	70
Tabla 4.5. Porcentaje captado en la toma en la relación a la tasa en la cola del embalse	73
Tabla 4.6. Diámetros obtenidos de las granulometrías	76
Tabla 4.7. Diámetro característico obtenido en la captación.....	76
Tabla 4.8. Granulometría del río Negro para un caudal pico de 280 m ³ /s (Pacheco & Carrillo, 2012b).....	77
Tabla 4.9. Parámetros de la partícula obtenida en la captación.....	78
Tabla 4.10. Clasificación del material según el método del hidrómetro.....	78
Tabla 4.11. Análisis granulométrico	78
Tabla 4.12. Relación de sólidos captados en función de la relación de toma	79



Dedicatoria

Dedico el presente trabajo de Tesis en primer lugar a Dios, quien me dio la fe, fortaleza, salud y esperanza a lo largo de todos estos años de carrera, y por brindarme la bendición para poder llegar a un buen término los estudios universitarios.

A mis padres Arsecio y Teresa, a mi madrina Marianela García, por el sacrificio realizado para que pudiera convertirme en un profesional, y por el apoyo que me han brindado a lo largo de todos estos años de formación.

A mis hermanas Rosa, Fanny, Celia, Mercedes, Leonor, Beatriz, a mis hermanos Patricio y Marcelo, por el apoyo y aporte que me han brindado para que haya llegado a esta etapa de la vida, a mis cuñados y cuñada por estar conmigo en este camino universitario.

A mis sobrinos y sobrinas, a quienes quiero mucho, que más que sobrinos son como mis amigos.

A mi compañero de tesis Xavier por acompañarme durante todo este arduo camino y compartir alegrías y fracasos, para que esta tesis se haga realidad.

A todas las personas que han formado parte de mi vida a las que agradezco su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida, especialmente a María de Lourdes que en una parte de mi vida fue una persona que me supo apoyar y estar conmigo en las buenas y malas.

Y a todos mis amigos y amigas que en su debido momento me brindaron ánimos y ayuda en seguir adelante.

Marco

A mis padres, Rodrigo e Isabel, que gracias a sus consejos y apoyo me han dado la fuerza para cumplir mis metas y objetivos en cada momento de mi vida, siendo ellos, mi ejemplo a seguir.

A mis hermanos, Fernando e Iván, que siempre estuvieron conmigo, apoyándome de una u otra manera, y me enseñaron a nunca rendirme y luchar por alcanzar mis metas.

A mis sobrinos, Eduardo y Martín, que me alegran la vida y me impulsan a seguir cada día.

A mi compañero de tesis Marco, con el que hemos logrado cumplir este trabajo y cumplir una meta más en nuestra vida académica.

A mis amigos y compañeros, que estuvimos juntos en la carrera universitaria, con los que hemos encontrado la manera de apoyarnos mutuamente.

Xavier



Agradecimiento

A Dios por habernos brindado la salud para poder terminar esta tesis, y a nuestros padres por su incondicional apoyo, sacrificio y motivación recibidos en nuestra formación académica.

Al PROMAS por darnos la oportunidad de trabajar en este proyecto, facilitarnos todos los implementos necesarios para el desarrollo de este trabajo y por hacernos sentir parte del grupo de trabajo del mismo.

Agradecemos de sobremanera al Ing. Esteban Pacheco y a la Ing. Verónica Carrillo, quienes con sus esfuerzos y apoyos nos han guiado a largo de este trabajo, al Ing. Agustín Rengel y a la Lcda. Rosa Ávila por apoyarnos en su momento.

A cada uno de nuestros compañeros, con los que hemos trabajado conjuntamente para el desarrollo de todas las tesis.

Marco Anguisaca,
Xavier Maza,
Cuenca, Octubre 2012



1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Para el proyecto de generación Hidroeléctrica HIDROSANBARTOLO, a emplazarse en el río Negro, provincia de Morona Santiago, se ha establecido de acuerdo a estudios previos, que la ubicación y construcción de la bocatoma, debido a condiciones geológicas, geomorfológicas y por cotas del proyecto; corresponde a condiciones no acorde a los criterios de diseño y que revestirían riesgos para las obras asociadas al proyecto. En este sentido la empresa HIDROTECH S.A. con el objeto de disponer de elementos suficientes para la toma de decisiones, en convenio con el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo – PROMAS de la Universidad de Cuenca, ha financiado un estudio que evalúe el desempeño hidráulico de la obra de captación mediante un modelo físico de escala reducida.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

Estudiar el desempeño hidráulico y los procesos asociados al flujo para la bocatoma del proyecto de generación hidroeléctrica Hidrosanbartolo mediante un estudio en modelo físico a escala reducida.

1.2.2 ESPECIFICOS

- Identificar los procesos de flujo para la bocatoma.
- Describir los procesos relacionados a la carga de sedimento en suspensión en la bocatoma, a través del análisis en el modelo físico.
- Evaluar el desempeño hidráulico de la bocatoma en consideración de los procesos de flujo y de los procesos relacionados a carga de suspensión relevantes.



1.3 ALCANCE

El alcance del presente trabajo ha sido establecido en términos de una identificación y caracterización del sedimento en suspensión susceptible de ingresar a la obra de captación; así como la evaluación del desempeño hidráulico a fin de permitir la incorporación de los resultados para disponer de criterios adicionales en el diseño final de la obra. Para el desarrollo de esta propuesta de investigación, se ha implementado un modelo hidráulico de lecho móvil, el cual ha permitido el establecimiento de las consideraciones requeridas para los objetivos planteados en el estudio. Con el presente trabajo se pretende adicionalmente dar un aporte para estudios complementarios que permitan futuras publicaciones relacionadas al tema.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los ríos son elementos naturales que constituyen un enlace con la vida y sostenibilidad humana, que captan las aguas de una cuenca y las transportan hasta su desembocadura. El agua que es transportada por el río puede ser utilizada para beneficio humano, para el caso de investigación se trata del río Negro en el que se va implantar una obra de captación para el Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo, la que debe cumplir con condiciones económicas, sociales y ambientales que generen el mayor beneficio con el menor impacto.

Como cualquier otra estructura hidráulica requiere de un diseño óptimo, se consideró necesaria para este caso la creación de un modelo hidráulico, en el cual se puede analizar un gran número de posibilidades, para el caso de estudio se trata de una bocatoma en la que es posible estudiar su comportamiento para diferentes caudales en el río, y para diferentes cantidades del transporte de sedimentos.

La captación de agua y la entrada de sólidos son fenómenos que tienen dificultades en ser modeladas exclusivamente de forma matemática por lo cual se vuelve necesario recurrir a modelos hidráulicos, con el objetivo de realizar diferentes simulaciones de escenarios que verifiquen el diseño de la estructura, para aportar alternativas de diseño o modificaciones al proyecto en caso de ser necesario, a fin de proyectar una estructura hidráulica económicamente sustentable.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 PROCESOS DE FLUJO Y DE SEDIMENTOS EN OBRAS HIDRÁULICAS: CASO DE ESTUDIO DE UNA CAPTACIÓN

2.1.1 GENERALIDADES

El término transporte de sedimentos se refiere al transporte de material a través de corrientes naturales. Este material transportado comprende: la carga de fondo, la carga en suspensión y la carga en saltación; esta última es una combinación de las dos primeras. La suma de las tres cargas se denomina carga total.

El material de fondo o carga de lecho se refiere al material granular que se caracteriza por partículas que ruedan a lo largo del lecho, mientras que el material en suspensión o carga en suspensión es el material también granular que se mantiene en suspensión debido a la turbulencia. Cuando las dos (carga de lecho y en suspensión) están formados por el mismo material en ocasiones resulta difícil distinguir cada tipo.

2.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS

Se distinguen dos tipos de sedimentos: el material cohesivo como arcillas y lúgamos, y el material no cohesivo como arenas y gravas.

PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS INDIVIDUALES

La mayor parte de sedimentos naturales tiene su densidad parecida a la del cuarzo. La densidad del cuarzo y minerales de arcilla es:

$$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$$

La densidad relativa de las partículas es una medida adimensional y se define mediante:

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

ρ_s : densidad de la partícula

ρ : densidad del fluido en el que se encuentra la partícula

Una característica muy importante para definir a los sedimentos es su tamaño para lo cual se establece su diámetro o tamaño del sedimento y se denota por d_s , debido a que



las partículas no son esféricas sino que presentan diferentes formas es necesario referir otras definiciones de diámetro.

- Diámetro de Tamiz: es el tamaño de la partícula que pasa a través de un tamiz de malla cuadrada de dimensiones específicas y es retenida por otro de dimensión menor.
- Diámetro de Sedimentación: es el tamaño de una esfera de cuarzo que se deposita con la misma velocidad la partícula de sedimento real.
- Diámetro Nominal: es el tamaño de una esfera de la misma densidad y masa que la partícula real.

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULA

El sedimento natural que es transportado presenta diferentes formas y tamaños. El tamaño del sedimento d_{50} característico es el tamaño para el cual 50% del peso del material es más fino que su valor correspondiente. De igual manera para los d_{10} , d_{75} y d_{90} son los tamaños para los cuales el 10%, 75% y 90% del peso del material es más fino, respectivamente. El d_{50} es el diámetro más utilizado como grano característico.

El rango de tamaños de partículas se expresa a menudo en términos del coeficiente de distribución S:

$$S = \sqrt{\frac{d_{90}}{d_{10}}} \quad (2)$$

Otro parámetro característico es la desviación estándar geométrica basada en una distribución log-normal de tamaños de grano σ_g :

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (3)$$

Valores pequeños de S y σ_g implican una distribución casi uniforme de tamaños, mientras que un valor grande de S significa una amplia distribución de tamaños (Martín Vide, 2003).

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULA

En un fluido en reposo una partícula se sedimenta, es decir que tiene un movimiento vertical hacia abajo. La velocidad terminal de sedimentación se define como la



velocidad de la partícula en equilibrio para la cual la sumatoria de fuerzas gravitacionales, de arrastre y flotación son cero. En un canal abierto la velocidad es afectada por la turbulencia y por las partículas que lo rodean.

Para una partícula esférica que se sedimenta en un fluido en reposo, la velocidad de caída w_0 se define por:

$$w_0 = -\sqrt{\frac{4gd_s}{3Cd}}(s - 1) \quad (4)$$

Donde d_s es el diámetro de las partículas y Cd es el coeficiente de arrastre. El signo negativo significa movimiento hacia abajo (para $s > 1$). El análisis dimensional implica que el coeficiente de arrastre es función del número de Reynolds y de la forma de la partícula. Las partículas de sedimentos tienen formas irregulares, con frecuencia son angulares y en ocasiones en forma de disco, por lo que se asume que el coeficiente de arrastre es mayor al de esferas. Para arenas y gravas se puede realizar una aproximación mediante la expresión:

$$Cd = \frac{24\mu}{\rho|w_0|d_s} + 1.5 \quad Re < 1 \times 10^4 \quad (5)$$

Un estimado de la velocidad terminal de caída de una partícula de sedimento se define por:

$$w_0 = -\sqrt{\frac{4gd_s}{3\left(\frac{24\mu}{\rho|w_0|d_s} + 1.5\right)}}(s - 1) \quad (6)$$

Donde:

- $|w_0|$: valor absoluto de la velocidad de asentamiento de la partícula
- g : aceleración de la gravedad
- d_s : diámetro de la partícula
- μ : viscosidad dinámica del fluido
- ρ : densidad del fluido
- s : densidad relativa de la partícula

HIDRÁULICA DE CORRIENTES ALUVIALES

Generalmente los ríos y corrientes obedecen a flujos en régimen permanente, alcanzándose las condiciones de flujo uniforme en equilibrio. La expresión para determinar la velocidad media del flujo está dada por:



$$V = \sqrt{\frac{8}{f}} \sqrt{\frac{D_H}{4} \sin \theta} \quad (7)$$

En la cual f es el factor de fricción de Darcy, D_H es el diámetro hidráulico y θ es la pendiente del lecho.

Para corrientes aluviales no es suficiente conocer la velocidad media del flujo para determinar la ocurrencia del movimiento de sedimentos, por lo que es necesario conocer el perfil de velocidades y específicamente la velocidad cerca del fondo del canal.

Considerando un flujo turbulento a lo largo de una frontera “lisa”, el campo de flujo puede dividirse en tres regiones (Chanson, 2002). La región de pared interna o subcapa viscosa, cerca de la pared sólida donde el esfuerzo turbulento es insignificante y el esfuerzo viscoso es grande. La región exterior en la cual el esfuerzo turbulento es grande y el esfuerzo viscoso es pequeño y una región de traslapeo o zona turbulenta. El espesor de la subcapa viscosa es alrededor de $10\nu/V_*$, donde ν es la viscosidad cinemática del fluido y V_* es la velocidad de corte.

La velocidad de corte establece que la relación entre el esfuerzo cortante del lecho y la densidad del fluido es:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (8)$$

Para un flujo uniforme de equilibrio hacia abajo de un canal abierto, la velocidad de corte promedio es:

$$V_* = \sqrt{g \frac{D_H}{4} \sin \theta} \quad (9)$$

Para un canal ancho, el diámetro hidráulico es alrededor de cuatro veces la profundidad de flujo, y la velocidad de corte se convierte en:

$$V_* \approx \sqrt{gd \sin \theta} \quad (10)$$

Remplazando (10) en (8) se obtiene el esfuerzo cortante del lecho para un canal ancho.

$$\tau_o \approx \rho g d \sin \theta \quad (11)$$



2.1.3 OTRAS PROPIEDADES RELACIONADOS A LOS SEDIMENTOS

COLOR Y TURBIEDAD

El agua que fluye por los ríos contiene diversas sustancias, provenientes de la erosión de la cuenca, escorrentía, o contaminaciones, que pueden estar en suspensión o en solución verdadera según el tamaño de disgregación del material que acarrea. De acuerdo a este material, el agua puede aparecer como turbia o coloreada, o ambas. El color está constituido por sustancias químicas, la mayoría de las veces provenientes de la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas. La turbiedad, es la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, a causa de las partículas minerales u orgánicas en forma de suspensión; principalmente por arcillas en dispersión, con un rango de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. En lagos la turbiedad es debida a dispersiones extremadamente finas y coloidales, en los ríos, es debido a dispersiones normales.

El término arcilla comprende una gran variedad de compuestos, pero en general se refiere a la tierra fina (0.002 mm de diámetro de grano o menos), a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua (Arboleda Valencia, 2000). La densidad de las arcillas es función del grado de humedad de la muestra, es decir cuanto más húmeda sea ésta, su densidad es menor. Por esto las arcillas dispersas en el agua tienen densidades relativamente bajas y lenta velocidad de asentamiento. El número, concentración y masa de las partículas así como su tamaño, forma el índice de refracción, influyen la turbiedad aparente de una suspensión.

En conclusión se puede decir que la turbiedad del agua se mide por los sólidos en suspensión que contienen y por el color. Al analizar la turbiedad de varias muestras de laboratorio, se puede llegar a obtener una correlación del comportamiento de las mismas. De los resultados obtenidos se obtiene una dispersión de puntos, los cuales se podrían ajustar a una ecuación de regresión. La ecuación que mejor se ajusta establece la relación entre la concentración de sedimentos en suspensión y la turbiedad de la muestra.

2.1.4 MOVIMIENTO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTO

UMBRAL DE MOVIMIENTO DE SEDIMENTOS EN EL LECHO

El umbral de movimiento describe las condiciones de flujo y frontera para las cuales inicia el transporte de sedimentos. Para un flujo en un canal abierto con un lecho móvil, las fuerzas que actúan sobre la partícula de sedimento son las que se muestran en la Figura 2.1.

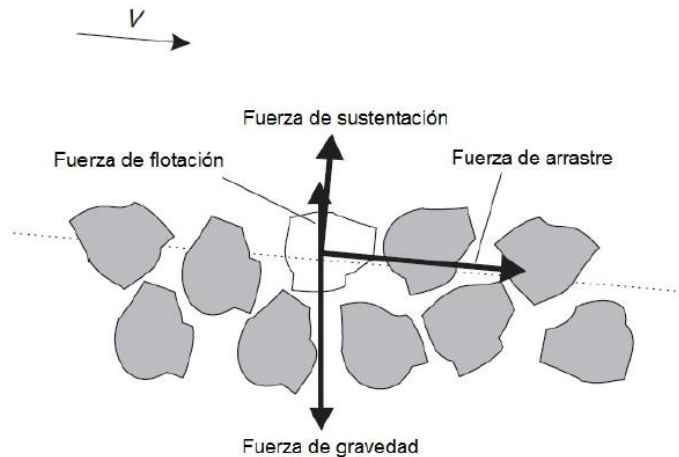


Figura 2.1. Fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento (Chanson, 2002)

El movimiento de las partículas ocurre cuando los momentos desestabilizantes (producido por las fuerzas de arrastre, sustentación y flotación) con respecto al punto de contacto, son mayores al momento estabilizante producido por la fuerza del peso.

Observaciones experimentales destacan la importancia del parámetro de estabilidad o parámetro de Shields y se define como:

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho(s-1)gd_s} \quad (12)$$

Se puede definir un valor crítico del parámetro de estabilidad en el umbral de movimiento. Shields demostró que este valor crítico es función del número de Reynolds de corte.

$$Re^* = \frac{V_* d_s}{\nu} \quad (13)$$

El movimiento de la carga de lecho ocurre cuando:

$$\tau_* > (\tau_*)_c$$

En resumen se dice que el inicio del transporte de la carga de lecho ocurre cuando el esfuerzo cortante de lecho es mayor que un valor crítico.

CARACTERÍSTICAS E INICIO DEL MOVIMIENTO DE LA CARGA EN SUSPENSIÓN

El material en suspensión que es transportado por un río proviene de procesos de erosión de la cuenca, tales como escorrentías, aguas subterráneas que afluyen al río y



durante episodios de lluvias y crecida fluvial. El material en suspensión está formado por partículas finas que se distribuyen por encima de la carga de fondo en toda la sección transversal del río. Teóricamente la concentración de sedimentos es mínima en la superficie y máxima en el fondo.

El movimiento del material en el lecho se produce cuando la fuerza tractiva es mayor a un valor crítico. Conforme la fuerza tractiva va aumentando llegará un punto en el que la velocidad de corte será mayor a la velocidad de asentamiento de las partículas y éstas entran en suspensión, es decir que su movimiento está asociado a la turbulencia del flujo y solo se asientan cuando la velocidad disminuye, o cuando el lecho se hace más liso.

Se debe tener presente que no existe un límite definido para diferenciar entre la carga en saltación y la de suspensión, por lo que no basta que una partícula se desprenda temporalmente del fondo para considerarla que se encuentre en suspensión.

INICIO DE LA SUSPENSIÓN Y ESFUERZO CORTANTE DE LECHO

Al considerarse una partícula es suspensión, el movimiento de la partícula en la dirección perpendicular al lecho se relaciona con el balance entre componente de velocidad de caída de la partícula y la fluctuación de la velocidad turbulenta en la dirección perpendicular al lecho (Chanson, 2002).

Estudios realizados sobre turbulencia proponen que la fluctuación de velocidad turbulenta es del mismo orden de magnitud que la velocidad de corte (Hinze, 1975; Schlichting & Gersten, 2004), por lo que un criterio simple para el inicio de la suspensión, sin tomar en cuenta el efecto de la pendiente de lecho esta dada por la expresión que se muestra a continuación, en la cual el valor crítico difiere de varios autores.

$$\frac{V_*}{w_0} > \text{valor crítico}$$

DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE CONCENTRACIONES

Mediante la integración de la ecuación de continuidad para sedimentos se establece la distribución de la concentración de sedimentos a través de la profundidad de flujo y está dada por:

$$c_s = (C_s)_{y=y_s} \left(\frac{\frac{d}{y} - 1}{\frac{d}{y_s} - 1} \right)^Z = (C_s)_{y=y_s} \left(\frac{d-y}{d-y_s} * \frac{y_s}{y} \right)^Z \quad (14)$$

$$Z = \frac{w_0}{KV_*}$$

Donde:

- c_s : concentración de sedimentos a una altura y del lecho
- $(C_s)_{y=y_s}$: concentración de sedimentos a la distancia y_s del fondo
- K : constante de von Karman ($K = 0.4$)
- V_* : velocidad de corte
- w_0 : velocidad de asentamiento de la partícula

La carga por debajo del nivel y_s se considera como de fondo. El valor adimensional Z se denomina número de Rouse o parámetro característico de la suspensión.

La expresión gráfica de la distribución vertical de concentraciones se representa en la Figura 2.2. Para esto se considera que la distancia y_s está definida como una franja de espesor $2 \cdot d_s$, siendo d_s el diámetro característico de las partículas constituyentes del fondo, para fines prácticos se considera que $y_s = 0.05 \cdot d$.

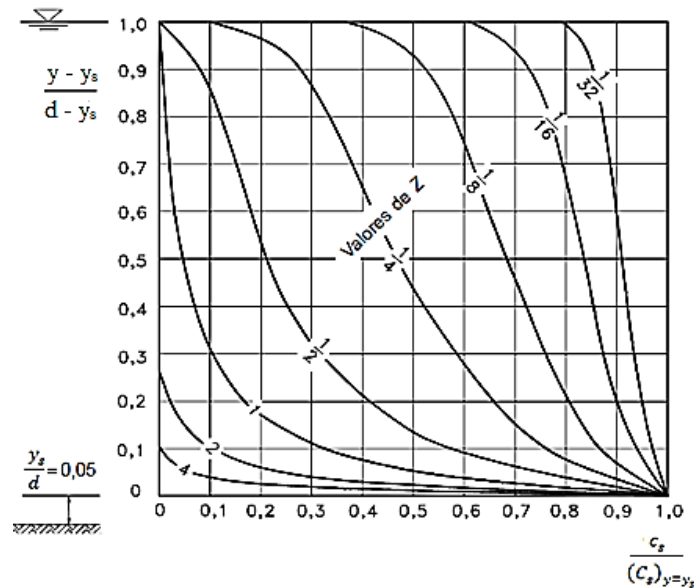


Figura 2.2. Distribución vertical de concentraciones (Rocha Felices, 1998)

Si la carga en suspensión está formada por partículas muy finas en una corriente de alta velocidad, es decir que tendrá baja velocidad de caída con una alta velocidad de corte, el valor de Z será pequeño lo que significa que no existirá mucha diferencia de las concentraciones a diferentes profundidades, en otras palabras se produciría una distribución uniforme de sólidos.

Pero por el contrario si la carga en suspensión estuviera formada por partículas cuya velocidad de caída fuese relativamente grande en un flujo de pequeña velocidad,

entonces existiría una fuerte gradiente vertical de concentraciones. En la Figura 2.3 se muestra la distribución de concentraciones en casos particulares.

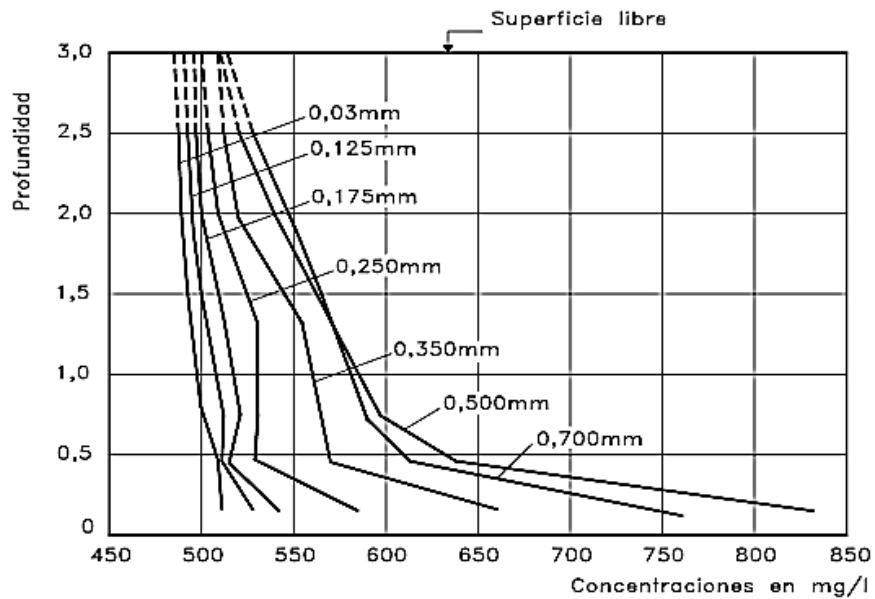


Figura 2.3. Distribución vertical de concentraciones en función del diámetro de las partículas (Rocha Felices, 1998)

TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN

La tasa de transporte de la carga en suspensión en un canal abierto está dada por la expresión:

$$q_s = \int_{\delta_s}^d c_s v dy \quad (15)$$

Donde:

- q_s : tasa de transporte volumétrica de carga en suspensión por unidad de ancho
- c_s : concentración de sedimentos
- v : velocidad local a una distancia y y perpendicular al lecho del canal
- d : profundidad de flujo
- δ_s : espesor de la capa de carga de lecho

Para determinar los valores de la concentración de sedimentos y el espesor de la capa de carga de lecho se utilizan las correlaciones de van Rijn debido a que éstas probablemente son las más seguras (Chanson, 2002).

$$(\delta_s)_{cl} = 0.3 * d_s * \left(d_s * \left(\frac{g * (s-1)}{v^2} \right)^{1/3} \right)^{0.7} \quad (16)$$

$$(C_s)_{cl} = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{g * (s-1)} \right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right)$$

Donde:

τ_{*c} : parámetro crítico de Shields para el inicio de la carga de lecho

d_s : tamaño del sedimento

τ_* : parámetro de estabilidad

s : densidad relativa

ν : viscosidad cinemática del fluido

La concentración de sedimentos en la capa de carga de lecho tiene un límite superior de 0.65 para granos redondeados, por lo tanto el valor de $(C_s)_{cl}$ se tomará el mínimo de entre los dos. La distribución de la concentración de sedimentos se representa en la Figura 2.4.

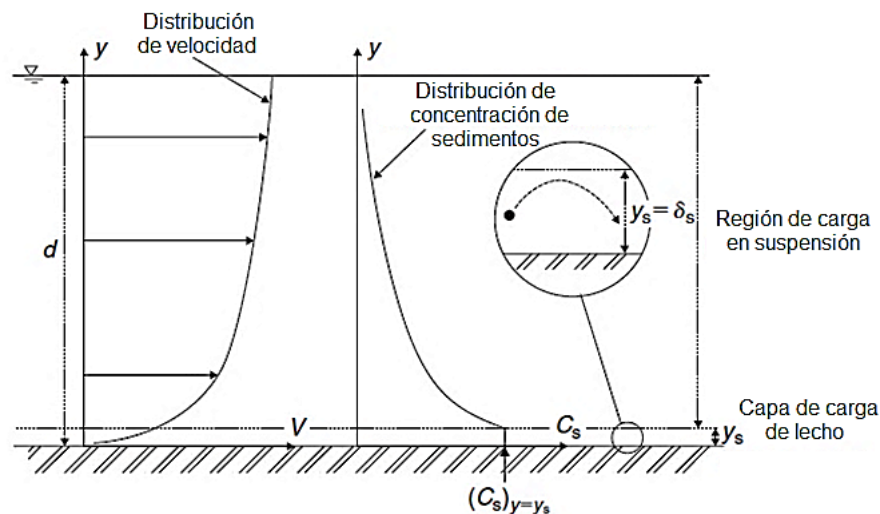


Figura 2.4. Esquema para flujos cargados de sedimentos (Chanson, 2002)

2.1.5 ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS RELACIONADOS A OBRAS DE CAPTACIÓN

DESCRIPCIÓN DE LA BOCATOMA

Una bocatoma se denomina a la estructura hidráulica construida en un río o canal con el objeto de captar parcialmente sus aguas. La cual puede utilizarse para distintos fines, como por ejemplo, para la generación de energía, irrigación, abastecimiento público e industrial entre otros. Este tipo de bocatomas operan continuamente durante

todo el año y es por eso que debe contar con elementos de control para operar en condiciones adversas, como las grandes avenidas.

La bocatoma puede ser de tipo superficial cuando capta agua desde un río o estero, mientras que si capta desde un embalse o lago es de tipo profunda. Generalmente en una bocatoma superficial la conducción está dada por un canal abierto o acueducto, en cambio para una bocatoma profunda la conducción se realiza por un túnel a presión.

La construcción de una bocatoma representa una alteración de las condiciones normales de escurrimiento, generando cambios fluviomorfológicos importantes, como erosión y sedimentación. En la Figura 2.5 se muestra las partes que conforman una bocatoma.

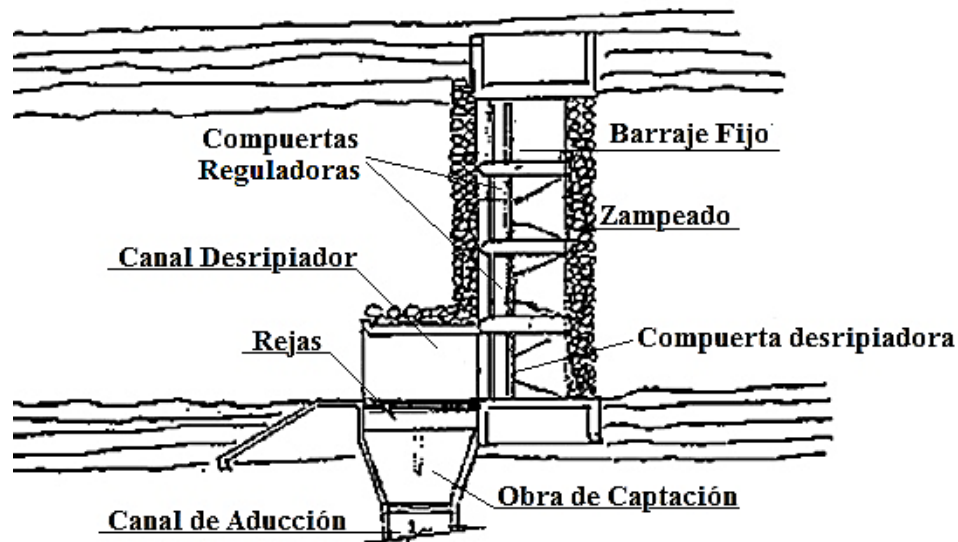


Figura 2.5. Partes de una bocatoma

OBRA DE CAPTACIÓN

La obra de captación llamada también “obra de toma” constituye el inicio del canal de conducción. Está constituida por un umbral ubicado a cierta altura sobre el lecho del río, para evitar la entrada del material fluvial, adicionalmente, mediante paños de rejas se evita la entrada de material flotante como ramas, hojas, troncos, etc. Las compuertas deben controlar el caudal que entra al canal durante las crecidas, para evitar el desborde de la conducción.

CLASIFICACIÓN DE LAS BOCATOMAS

La clasificación de las bocatomas presenta un carácter teórico y práctico. Desde el punto de vista teórico permite una apreciación de los fenómenos y condiciones de funcionamiento. Y desde el punto de vista práctico es importante para la selección de toma para un caso dado. Según esto se pueden clasificar de acuerdo a diversos criterios.

Teniendo en cuenta su finalidad

- Irrigación
- Central hidroeléctrica
- Abastecimiento público
- Uso industrial
- Uso múltiple

Según el nivel de la toma con respecto al río

- Con nivel libre
- Con captación profunda
- Con captación por infiltración

Según el emplazamiento con respecto al río

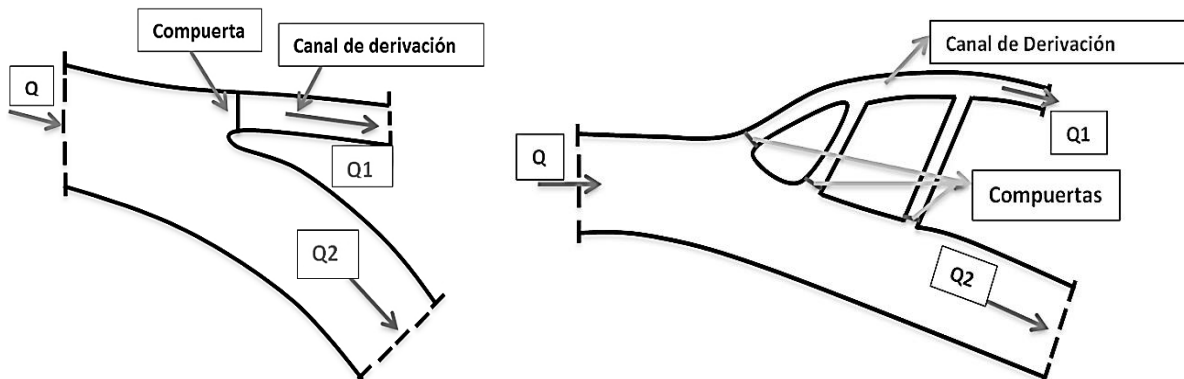
- Toma con captación desde una margen (lateral)
- Toma con captación en el río (frontal)
- Toma con captación desde ambas márgenes (bilateral)

Según el criterio de funcionamiento

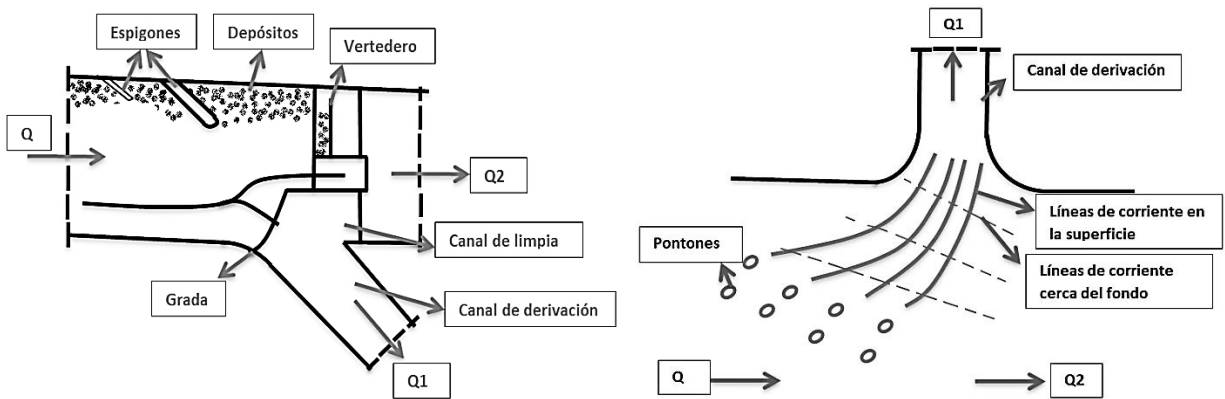
- Toma por gravedad
- Toma por bombeo

Según la manera de combatir el ingreso de sólidos, distinguimos entre la toma libre los siguientes tipos (Rocha Felices, 1991):

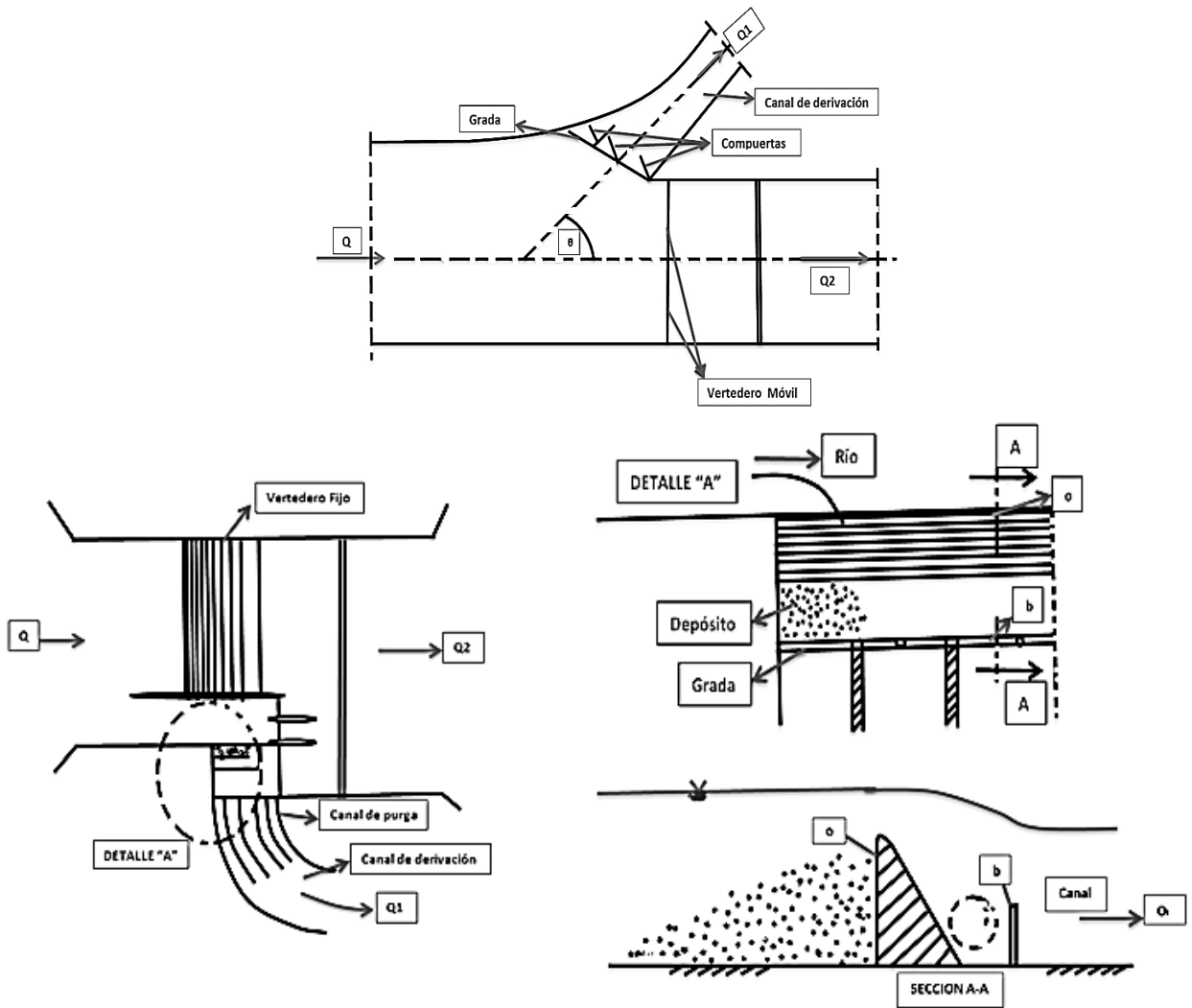
- Toma sin ningún dispositivo inicial.



- Toma con efectos especiales (espigones, pontones, etc.).



- Toma con barraje (con captación a ángulo recto o inclinado).



CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE BOCATOMAS

1. UBICACIÓN DE LA BOCATOMA

La ubicación de una bocatoma es importante en el cauce del río dentro de un proyecto, por lo que se recomienda que el sitio elegido reúna por lo menos las siguientes condiciones:

- La dirección a ruta del flujo de agua debe ser lo más estabilizada o definida.
- La captación del agua a ser derivada debe ser posible aún en tiempo de estiaje.
- La entrada de sedimentos hacia el caudal de derivación debe ser limitada en el máximo posible.

Un lugar recomendable que cumpla con las condiciones mencionadas, se encuentran aguas abajo del centro de la parte cóncava en los tramos curvos de un río, como se explica en la Figura 2.6.

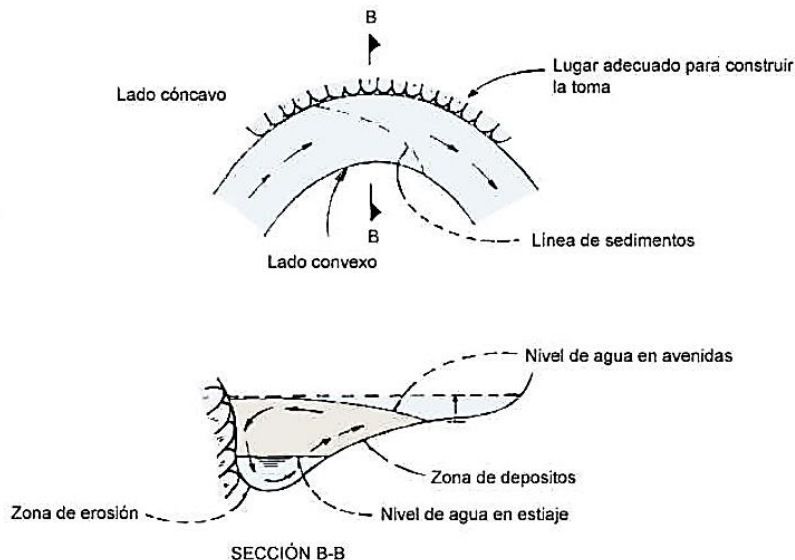


Figura 2.6. Ubicación de la toma en tramos curvos (Mansen Valderrama, 2011)

Por otro lado este lugar de construcción de la toma tiene que cumplir las condiciones topográficas (cota de captación), geológicas y geotécnicas, también debe presentar facilidades constructivas (disposición de materiales) y evitar en lo posible inundaciones o daños a construcciones aledañas.



2. TOPOGRAFÍA

Definida la posible ubicación, se realizarán trabajos topográficos, con las siguientes recomendaciones:

- Levantamiento en planta del cauce del río, entre 500m. a 1000m; tanto aguas arriba como aguas abajo del eje del azud, la escala recomendada es 1:2000.
- Levantamiento de la zona de ubicación de la bocatoma, se recomienda un área de 100m x 100m como mínimo, la escala no debe ser menor de 1:500.
- Perfil longitudinal del río, por lo menos 1000m, tanto aguas arriba como aguas abajo del eje del azud; la escala recomendada es $H = 1:2000$ y $V = 1:200$.
- Secciones transversales del cauce del río a cada 50m en un tramo comprendido 1000m aguas arriba y 500m aguas abajo del eje del azud; la escala variara entre 1:100 y 1:200.

3. CONDICIONES GEOLÓGICAS Y DE GEOTECNIA

Es importante conocer las condiciones geomorfológicas, geológicas y geotécnicas, ya que su conocimiento permitirá dimensionar en mayor seguridad la estructura; por lo que se recomienda la obtención de los siguientes datos como resultado de los estudios geológicos – geotécnicos:

- Curva de graduación del material conformante del lecho del río
- Sección transversal que muestre la geología de la zona de ubicación de la bocatoma.
- Coeficiente de permeabilidad.
- Capacidad portante.
- Resultados sobre ensayos de hincado de pilotes ó tabla estacas.
- Cantidad de sedimento que transporta el río.

4. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

Es de suma importancia conocer el comportamiento hidrológico del río, ya que esto permitirá garantizar el caudal a derivar y así como también definir el dimensionamiento de los elementos conformantes de la bocatoma. Entre los datos a obtener se tienen:

- Caudal del diseño para una avenida máxima.
- Caudales medios y mínimos.
- Curva de caudal versus tirante en la zona del azud.



DAÑOS CAUSADO POR LOS SÓLIDOS

Depósitos en los canales: el material sólido captado se deposita a lo largo de los canales de conducción, generando una reducción de la sección útil y un aumento de la resistencia por incremento de la rugosidad del fondo.

Erosión en los canales: puede producirse la erosión del revestimiento del canal por la presencia de sólidos y por altas velocidades de la corriente.

Erosión de las turbinas: este es uno de los problemas más graves que se presentan en las centrales hidroeléctricas. La erosión es función de la concentración, calidad mineralógica, forma y tamaño de las partículas, así como de la velocidad, la que depende de la altura de caída y del tipo de turbina.

Sedimentación de embalses: los sólidos que son transportados por la corriente se depositan en el embalse, disminuyendo así su capacidad útil.

Disminución de la captación: esto se da cuando los sólidos se acumulan frente a la toma, disminuyendo la captación. Una avenida de sólidos puede obstruir totalmente la captación.

CONDICIONES DE DISEÑO – EFICIENCIA

La presencia e ingreso del material sólido determina las condiciones de funcionamiento y aprovechamiento de la obra de captación, y la purga queda definida en términos del agua no captada, sea por no haberse podido tomar del río o porque luego de su captación se utilizó para la purga. De esto se dice que la eficiencia es la relación entre la cantidad de agua realmente incorporada al canal o tubería de derivación y aquella que podría haberse captado desde el punto de vista de las disponibilidades hídricas.

Los factores que tienden a disminuir la captación real son:

- La necesidad de mantener en el río un gasto remanente, lo suficientemente grande como para evitar sedimentación y permitir el arrastre de los sólidos no captados.
- El gasto empleado por medio de un canal de purga para eliminar el material sólido grueso inmediatamente después de su ingreso.

El diseño de una bocatoma debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Asegurar la derivación permanente del caudal de diseño.
- Proveer un sistema de compuertas para dejar pasar las avenidas, que tienen gran cantidad de sólidos y material flotante.

- Captar el mínimo de sólidos y disponer de medios apropiados para su evacuación.
- Puntualizar que en aguas extraordinarias se renuncia a la captación.
- Estar ubicada en un lugar que presente condiciones favorables desde el punto de vista constructivo.
- Conservar aguas abajo, suficiente capacidad de transporte para evitar sedimentaciones.

BIFURCACIONES

Corresponde a una forma simple de captación sin ninguna estructura de guía o encauzamiento de un canal principal. Se considerará un canal principal de ancho B del que se deriva un canal lateral de ancho b' , y el ángulo formado por el eje del canal principal y el eje del canal lateral representado por θ se denominará ángulo de derivación, ver Figura 2.7.

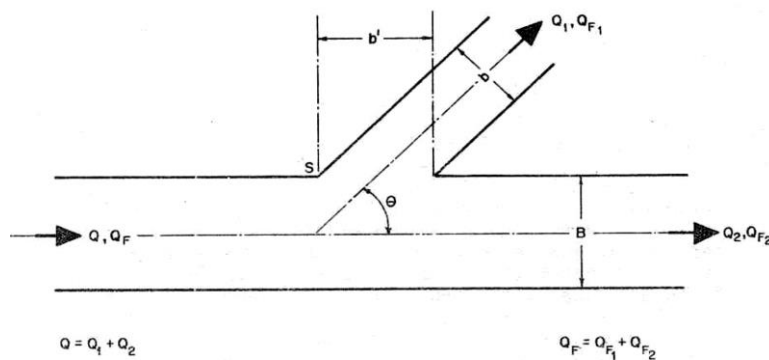


Figura 2.7. Representación esquemática de una bifurcación (Rocha Felices, 1978)

En el cauce principal circula un gasto Q del cual se deriva un gasto Q_1 hacia el canal lateral, quedando un gasto Q_2 remanente en el río.

El río, en este caso el canal principal, transporta también una cierta cantidad de material sólido (Q_F) la misma que se distribuiría en Q_{F_1} y Q_{F_2} ; estableciendo las siguientes ecuaciones de continuidad:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$Q_F = Q_{F_1} + Q_{F_2}$$

Sin embargo la validez de la última ecuación está relacionada en el tiempo, debido a que se pueden producir fenómenos locales de sedimentación y erosión en periodos relativos de corto tiempo y el equilibrio se logra después de transcurrido un cierto tiempo.

Por lo que el equilibrio se define, para un tramo de un río, como la igualdad entre las cantidades de sólidos que entran y salen por los extremos. Esto es, si el volumen de sólidos que ingresa es menor que el volumen de sólidos que sale se dice que hay erosión, caso contrario existe sedimentación.

El transporte de sólido total Q_F se puede dividir en transporte sólido de fondo Q_G y transporte sólido en suspensión Q_S , teniendo:

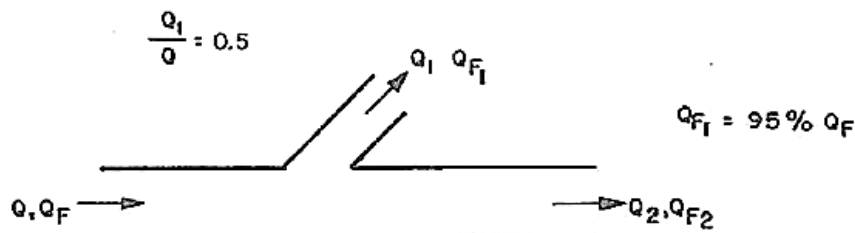
$$Q_F = Q_G + Q_S$$

La finalidad de obras de captación destinadas a proyectos hidroeléctricos consiste en captar un caudal líquido (Q_1) con la mínima cantidad material sólido Q_{F1} .

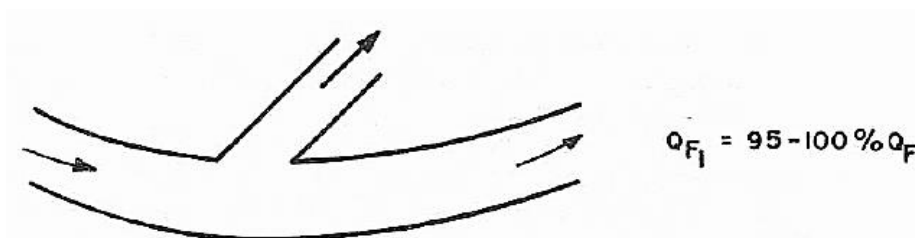
Un parámetro que describe el comportamiento de los sólidos en una bifurcación es la curvatura. En las siguientes figuras se muestran los porcentajes captados de material sólido de fondo, con el objetivo de mostrar la influencia de la ubicación del canal lateral en una curvatura del canal principal o del río, para esto en todos los casos la proporción de toma es:

$$\frac{Q_1}{Q} = 0.5$$

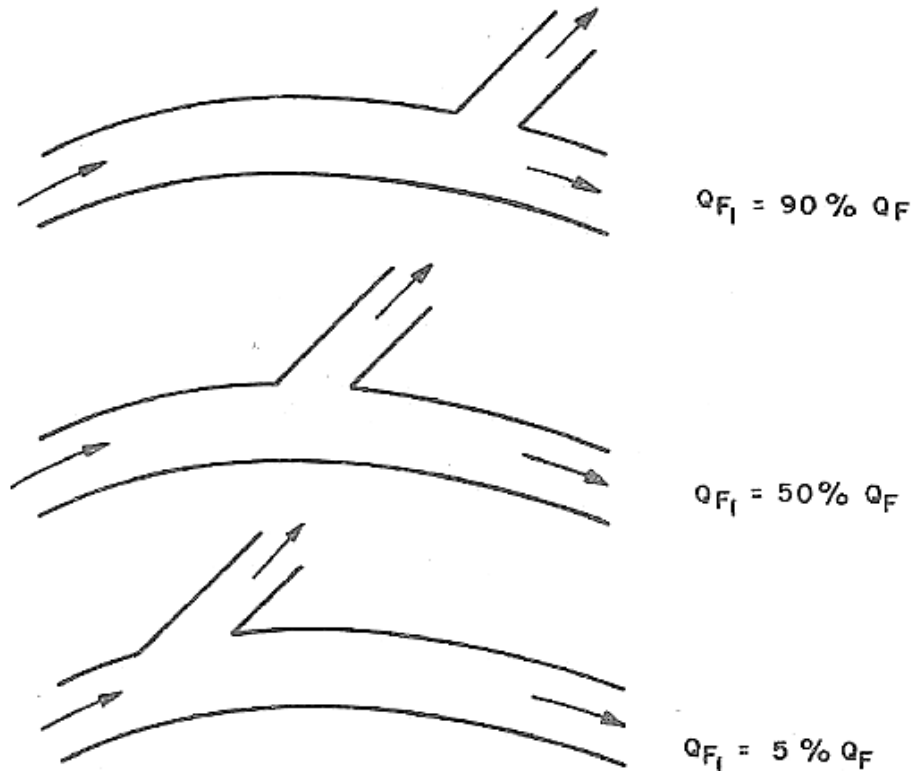
- La bifurcación está en un tramo recto e ingresa el 95% de los sólidos de fondo.



- La bifurcación está ubicada en el margen interior de un tramo curvo, por lo que prácticamente la totalidad del gasto de sólido ingresa al canal lateral.



- En estos casos la bifurcación se encuentra ubicada en el margen exterior de un tramo curvo.



Por lo que se puede decir que los mejores resultados se obtienen cuando la captación se aproxima a la iniciación de la curva.

Para una captación con derivación superficial, la toma se fundamenta en el aprovechamiento o generación de corrientes secundarias que por un lado ofrecen tirantes mayores para la derivación y por otro alejan los sedimentos de la zona de la bocatoma.

Otro parámetro característico que describe el comportamiento en una bifurcación es la relación de toma, que representa la relación entre el gasto específico captado y el gasto específico en el río. La relación de toma y las características geométricas del escurrimiento determinan que se produzcan superficies de separación. Para comprender el fenómeno se puede distinguir una línea de separación en el fondo y en la superficie, dichas líneas están unidas por una superficie curva, por lo que para cada altura hay un ancho b_h , el cual aumenta con el gasto líquido captado. Cuando existe la presencia de una grada altera la forma de esta superficie de separación, generándose una alteración como se aprecia en la Figura 2.8.

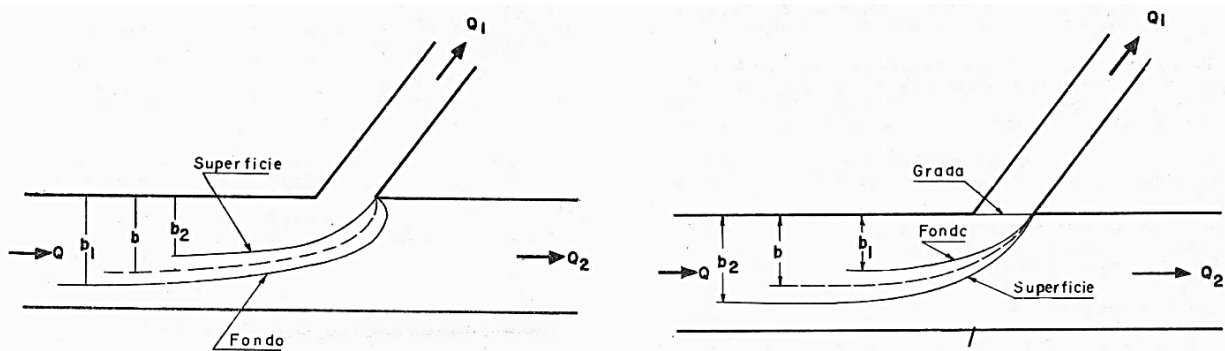


Figura 2.8. Líneas de separación (Rocha Felices, 1978)

No existe un criterio uniforme y universal para la determinación del ancho de separación b_h en una bifurcación libre. En general; b_h aumenta con el gasto líquido captado. Pero de varias formulaciones y resultados se ha establecido que el ancho de separación en el fondo es 50% mayor que el ancho en la superficie, es decir:

$$\frac{b_1}{b_2} = 1.5$$

Además se ha comprobado que al aumentar la proporción de toma (Q_1/Q), aumenta el ancho comprometido y es mayor en el fondo. Se puede decir que en cuanto a la relación de toma sobre la captación según investigadores, lo siguiente:

- Cuanto mayor es la relación de toma, mayor es la proporción de sólidos captados.
- La relación de toma es el parámetro que tiene mayor influencia sobre la captación de sólidos.

La relación de toma es importante en el diseño para proyectar el esquema de funcionamiento y operación de una bocatoma.

El funcionamiento eficiente de una bocatoma tiene que estar basado en el principio de no aceptar una relación de toma tan alta, pues se podrían presentar dos problemas. Uno de ellos es que el gasto remanente en el río sea tan bajo que no permite la suficiente capacidad de transporte para arrastrar los sólidos aguas abajo. El otro problema reside en el hecho de que si se capta el 100% del agua será inevitable captar el 100% de los sólidos.

A fin de estudiar la distribución del gasto sólido en suspensión, nos basamos en las investigaciones de (Dancy, 1947), el cual realizó estudios experimentales en un canal principal y lateral de sección rectangular de 0,15 m de ancho y 0,125 m de altura. Las conclusiones experimentales se representa gráficamente en la Figura 2.9 en la que se

muestra la vinculación entre el coeficiente de captación Sólida y la Relación de toma, en función del parámetro adimensional α y para un ángulo de bifurcación de 30° . Para este gráfico, a partir de las mediciones de (Dancy, 1947), fue necesario calcular en cada caso la velocidad de caída de las partículas y la velocidad de corte y determinar así el parámetro α .

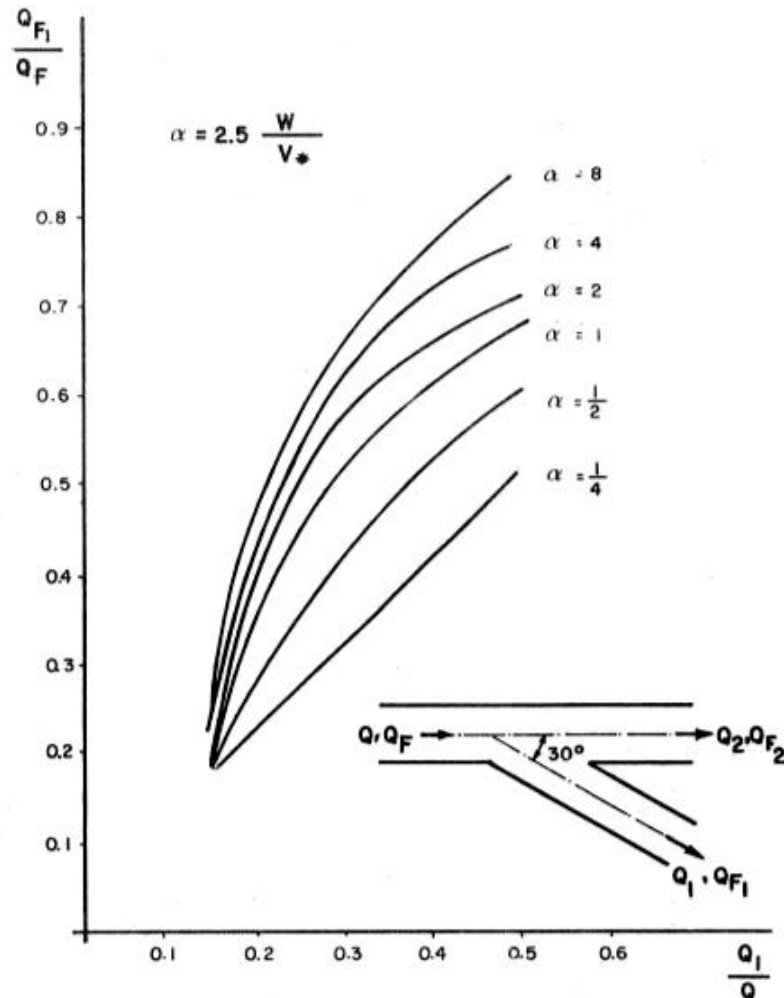


Figura 2.9. Relación entre Q_{F1}/Q_F y Q_1/Q en función del parámetro adimensional α (Rocha Felices, 1978)

En este gráfico se puede apreciar que para valores altos de α , los que corresponden a grandes concentraciones de material de sólido en la zona cercana al fondo, la distribución tiende a realizarse según el efecto (Bulle, 1926), que dice que en una bifurcación las capas inferiores del escurrimiento, cargadas de sedimentos, se dirigen preferentemente hacia el canal de derivación o lateral; por otro lado para valores pequeños de α , los cuales corresponden a una distribución vertical casi uniforme del



material en suspensión, la proporción de gasto sólido captado tiende a ser igual a la de los gastos líquidos.

2.2 MODELACIÓN FÍSICA. HIDRÁULICA DE LECHO MÓVIL

2.2.1 INTRODUCCIÓN

Para poder lograr un diseño eficiente de las estructuras hidráulicas que están en contacto con un río, es necesaria la predicción o estimación de su comportamiento con las estructuras hidráulicas, la cual es uno de los grandes problemas en los proyectos de ingeniería fluvial. Un diseño eficiente 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 estudiarlo mediante un modelo hidráulico, su principal ventaja es tener un flujo tridimensional, que además ayuda al ingeniero en los casos en los que la teoría sea incompleta o inexistente.

Un modelo hidráulico es una representación esquemática a escala, de una parte de la naturaleza y de las obras proyectadas en ella. El modelo debe entenderse como un complemento, no como un elemento sustitutorio, se debe proporcionar al modelo la mayor cantidad posible de datos, de la mejor calidad, para que el modelo nos brinde información valiosa.

Al estudiar el comportamiento hidráulico en un modelo de un río, este no solo permite obtener un diseño seguro, sino también más eficiente y económico. Cuando no se cuenta con un modelo hidráulico se toman rangos de seguridad muy amplios llegando a encarecer el proyecto. El estudio en modelo hidráulico permite dar dimensiones para un funcionamiento eficiente, además de reproducir diversidad de exigencias y de condiciones naturales.

El problema de la investigación en modelos consiste en establecer con un cierto grado de aproximación la forma en la que la naturaleza va a reaccionar frente a una obra hecha por el hombre. Por lo que se tienen que considerar estos aspectos:

- El fenómeno natural (un río o una costa).
- La obra proyectada y su influencia sobre el fenómeno natural.
- La extensión espacial y temporal de los efectos producidos por la obra.

El objetivo principal que debe cumplir un modelo hidráulico es el de representar adecuadamente las condiciones naturales. Si se trata de estudiar una bocatoma, primero debe reproducirse el río en un modelo hidráulico. El río forma parte del modelo y como tal debe cumplir las leyes de la hidráulica fluvial, es decir debe representar correctamente al río en estudio.

Reproducidas las condiciones naturales y habiéndose asegurado que existe una analogía, se podrá investigar en el modelo el comportamiento de la estructura. Para



UNIVERSIDAD DE CUENCA

llegar a esta analogía se requiere, en la mayoría de los casos, un largo proceso de calibración. La construcción de una estructura en un río o en la costa representa una alteración de las condiciones naturales y debe preverse la reacción de la naturaleza.

En un modelo físico se dice que las condiciones de flujo son análogas a las del prototipo, si el modelo presenta una similitud de forma (geométrica), de movimiento (cinemática) y de fuerzas (dinámica).

Todo modelo tiene escalas que dependen del criterio de similitud adoptada. La similitud geométrica relaciona cantidades (longitud, área y volumen) del prototipo con respecto a las del modelo. Se denomina escala (L) a la relación entre un valor del prototipo y su correspondiente valor del modelo.

$$L_r = \frac{L_{PROTOTIPO}}{L_{MODELO}} \rightarrow \text{Longitud}$$

La similitud cinemática implica que las relaciones de las velocidades del prototipo con respecto a las del modelo son las mismas.

$$V_r = \frac{V_{PROTOTIPO}}{V_{MODELO}} \rightarrow \text{Velocidad}$$

La similitud dinámica implica que las relaciones de las fuerzas del prototipo con respecto a las del modelo son iguales.

$$F_r = \frac{F_{PROTOTIPO}}{F_{MODELO}} \rightarrow \text{Fuerza}$$

Con estas relaciones se pueden deducir relaciones de escala subsecuentes para masa, tiempo, caudal y presión.

$$M_r = \rho_r L_r^3 \rightarrow \text{Masa}$$

$$t_r = \frac{L_r}{V_r} \rightarrow \text{Tiempo}$$

$$Q_r = V_r L_r^2 \rightarrow \text{Caudal}$$

$$P_r = \frac{F_r}{L_r^2} \rightarrow \text{Presión}$$

Además se pueden deducir otras relaciones para situaciones específicas de flujo.



2.2.2 MODELOS FLUVIALES DE LECHO MOVIL

Este tipo de modelos son de lecho erosionable, y su objetivo es representar correctamente la configuración general del fondo y las cantidades de material sólido arrastrado por la corriente fluvial. De modo que para modelos de lecho móvil los efectos gravitacionales son predominantes sobre las fuerzas inerciales, es por esto que debe cumplirse la similitud de Froude.

$$Fr_p = Fr_m \quad (17)$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{g_m y_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g_p y_p}}$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{g_m y_m}{g_p y_p}}$$

Como la aceleración gravitacional es la misma en el modelo como en el prototipo, se tiene que:

$$\frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{y_m}{y_p}}$$

En la que la escala de velocidades y la longitudinal quedan definidas por

$$V_r = \frac{V_m}{V_p}$$

$$L_r = \frac{y_m}{y_p}$$

Quedando definido el escalamiento de la velocidad de la forma:

$$V_r = \sqrt{L_r}$$

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto Hidrosanbartolo 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 gigavatios (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 5500 metros para mantener una cabeza neta de 183 metros.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL AREA DEL PROYECTO

El proyecto está ubicado en la provincia de Morona Santiago, teniendo como centros poblados próximos a Copal, San Bartolo, La Delicia, La Dolorosa entre otros, ver Figura 3.1.

Coordenadas: 787.836 E
9'696.226 N (UTM WGS84 ZONA 17 S)

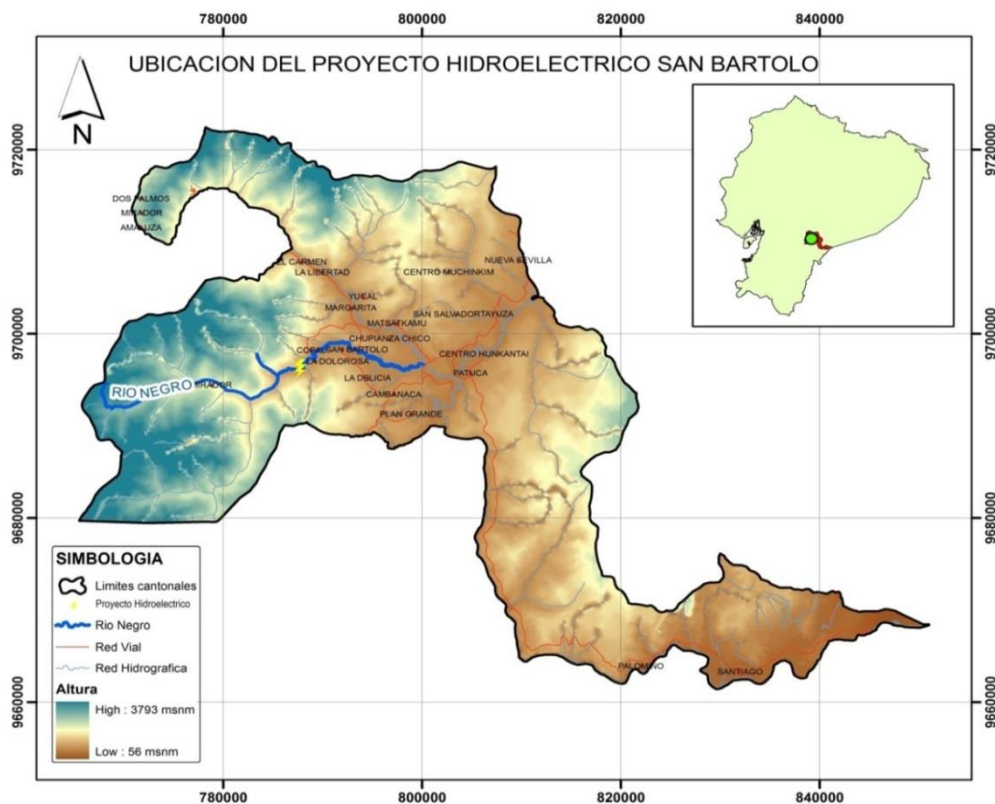


Figura 3.1. Localización del Proyecto Hidrosanbartolo



indicativo de los procesos vinculados a la zona de transición entre una zona de socavación hacia zonas de depositación.

3.2.2 UBICACIÓN DE LA BOCATOMA

Se determinó que la ubicación de la bocatoma, es el único lugar que cumple con condiciones geológicas, y topográficas. Sin embargo el lugar donde se va a emplazar la toma se encuentra en la parte convexa de la curva por lo que no cumple con las condiciones recomendadas para el diseño en los casos de un tramo curvo, ya que es una parte donde se puede presentar mayor azolvamiento de material, llegando con el tiempo a taponar las ventanas de captación de la toma, e incluso permitiría el transporte de material indeseable hacia las maquinarias ubicadas aguas abajo, es decir que se podrían tener efectos nocivos para los elementos de generación hidroeléctrica, como por ejemplo las turbinas.

3.3 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MODELAMIENTO DE LA OBRA DE CAPTACIÓN EN EL RÍO NEGRO

3.3.1 CONSIDERACIONES DE HIDROLOGIA FLUVIAL PARA EL MODELO

Puesto que el cauce de estudio (río Negro) corresponde a procesos dinámicos de erosión y de transporte, se han asociado a los fenómenos y procesos de flujo, a eventos de hidrología de regularidad y a la de eventos extremos.

En el estudio hidrológico realizado para el proyecto se determinó que el río Negro (Tabla 3.1) presenta un comportamiento de régimen amazónico, es decir que presenta los caudales mayores a mitad de año. Del estudio realizado para los caudales medios mensuales se ha fijado como caudal formativo del cauce y para efectos de modelación, el valor de 50 m³/s.

Año	En	Fe	Ma	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Se	Oc	No	Dic	Anu
	e	b	r					o	p	t	v		al
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 (Pacheco & Carrillo, 2012a)

3.3.2 CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL MODELO



Para una mejor comprensión del comportamiento de la morfología del cauce y trabajos de calibración, fue necesario considerar caudales correspondientes a los periodos húmedos en el rango de 75 m³/s, y para el equilibrio de la pendiente longitudinal y procesos de transporte de sólidos se consideró caudales que corresponden a periodos de retorno de 5 y 10 años.

Para establecer un cauce de equilibrio frente a los proceso de flujo hidráulico y de transporte de sedimentos, fue necesario considerar aspectos relevantes a pendiente longitudinal, caudal líquido, y caracterización de material transportado, todo esto dentro de un análisis cualitativo en el modelo.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO FÍSICO DE ESCALA REDUCIDA

El modelo físico para la bocatoma se ha planteado como un modelo de lecho móvil para efectos de identificar el comportamiento de procesos hidráulicos asociados al transporte de material y depositaciones de sedimentos en zonas críticas. En el cual se registran condiciones relevantes como:

- Identificar efectos producidos por la configuración geométrica de la obra de toma.
- Caracterizar condiciones hidráulicas de flujo, tales como calados y distribución de velocidades.
- Procesos de sedimento en suspensión.
- Identificar otros fenómenos hidráulicos que pudieran ser de interés y de obras complementarias para el funcionamiento de la bocatoma.

El escalamiento del modelo se ha definido considerando principalmente el espacio disponible en el cual se va a emplazar, además de la capacidad de suministro de caudal y otras condiciones subsecuentes al establecimiento de la escala del modelo.

3.4.1 ESCALAMIENTO LONGITUDINAL

En el caso de la obra de toma proyectada sobre el Río Negro se ha modelado sobre una superficie considerada suficiente para reproducir los efectos y fenómenos a ser estudiados. Dicha superficie resultó establecida en un área de 250 x 700 m que de acuerdo al espacio disponible se logra con:

$$L_r = \frac{1}{50}$$

Considerando aspectos tanto de capacidad del laboratorio, así como también aspectos relativos al flujo en el modelo (número de Reynolds principalmente), se ha establecido que la magnitud de ésta escala permite realizar el modelo en una escala no distorsionada.



3.4.2 ESCALAMIENTO DEL CAUDAL

De las relaciones obtenidas para un modelo de lecho móvil en escala no distorsionada, se tiene que el escalamiento para el caudal está definido por:

$$Q_r = (L_r)^{5/2}$$

Es decir:

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = L_r^{5/2} = \left(\frac{1}{50}\right)^{5/2} = 0.00005657$$

3.4.3 ESCALAMIENTO DEL HIDROGRAMA

Puesto que influye en el dimensionamiento del modelo los eventos hidráulicos. Se realizó un escalado del hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, obtenido del estudio hidrológico del proyecto. Para ello se efectuó el escalamiento de cada uno de los caudales del hidrograma, y con respecto al escalamiento del tiempo se emplearon las relaciones de escala correspondientes, quedando definido:

$$t_r = \sqrt{L_r}$$

$$t_r = \sqrt{\frac{1}{50}}$$

El hidrograma del río Negro para un período de retorno de 100 años, obtenido del estudio hidrológico se presenta en la Figura 3.4.

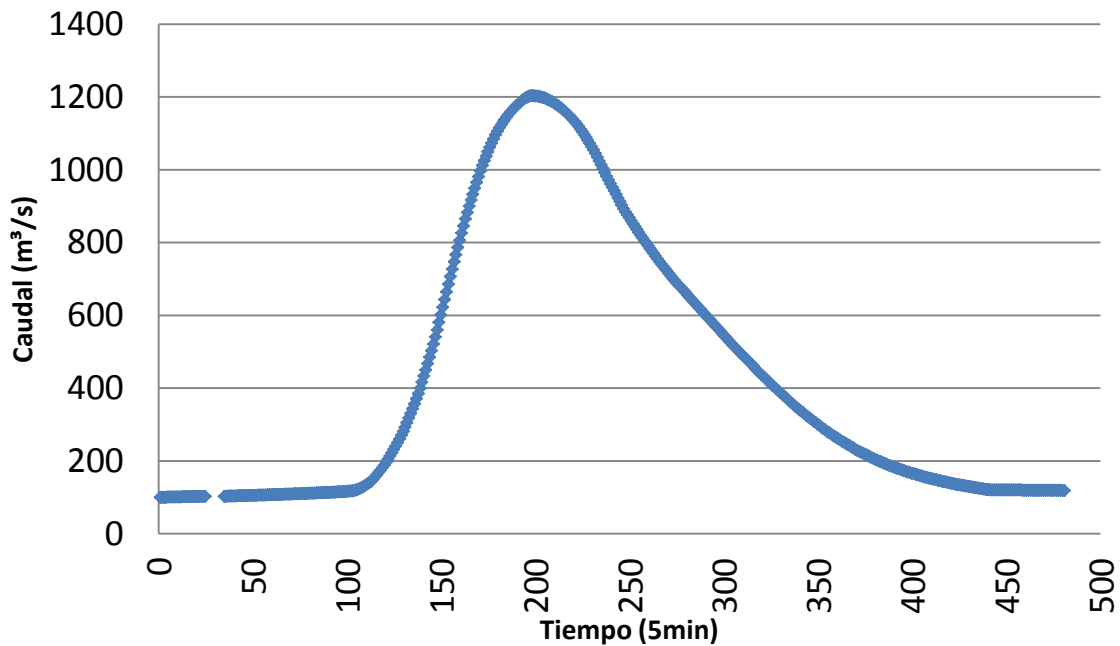


Figura 3.4. Hidrograma del río Negro para un período de retorno de 100 años

3.4.4 ESCALAMIENTO DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS PARA EL MODELO

En un modelo de lecho móvil, las partículas que son representativas del proceso de transporte de sedimentos han sido escalados considerando la condición:

$$\left(\frac{V_*}{V_s}\right)_m = \left(\frac{V_*}{V_s}\right)_p \quad ; \quad \frac{V_{s_m}}{V_{s_p}} = \frac{V_{*m}}{V_{*p}}$$

En donde V_s representa la velocidad de asentamiento y V_* es la velocidad de corte; reemplazando la velocidad de corte por la ecuación (10) tanto para el modelo como para el prototipo, se tiene:

$$V_{*m} = \sqrt{g \times y_m \times S_m}$$

$$V_{*p} = \sqrt{g \times y_p \times S_p}$$

$$\frac{V_{s_m}}{V_{s_p}} = \sqrt{\frac{g \times y_m \times S_m}{g \times y_p \times S_p}} = \sqrt{\frac{1}{50}}$$



$$Vs_m = 0.1414 * Vs_p$$

A partir de la granulometría del lecho, de acuerdo a la ecuación de (Soulsby, 1997), se han calculado las velocidades de sedimentación, en función del diámetro de la partícula, de su peso específico sumergido y de la viscosidad del fluido considerado:

$$Vs = \frac{v}{D} [(10,36^2 + 1,049D_*^3)^{1/2} - 10,36] \quad (18)$$

$$D_* = \left[\frac{gR}{v^2} \right]^{1/3} D$$

Donde:

g: aceleración de la gravedad

v: viscosidad cinemática del agua

D: diámetro medio de los granos

R: $(\rho_s - \rho)/\rho$, peso específico sumergido de los granos

Con la relación establecida para las velocidades de sedimentación del prototipo y modelo, y los valores obtenidos de la ecuación (18), para los diferentes diámetros de las partículas, se han determinado las velocidades de sedimentación en el modelo y en base a éstas y con la misma ecuación se establecieron los diámetros de los granos para el modelo.

3.4.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

En el proceso de modelización se han identificado dos tipos de variables a ser evaluadas debido a que el fenómeno de transporte de sedimentos se relaciona directamente con el caudal, además del comportamiento de la estructura.

VARIABLES CONTROLABLES

Caudal: se realizó la experimentación para caudales de interés que permitan identificar condiciones de respuesta hidráulica de la estructura. Los caudales empleados corresponden al caudal formativo adoptado, y el caudal representativo de los periodos húmedos anuales.

Tasas de Transporte: se ha incorporado al flujo a ser simulado las tasas de transporte de sedimento, las mismas que fueron determinadas para los caudales en consideración del estudio.



VARIABLES DEPENDIENTES

Son variables tanto de orden cuantitativo como cualitativo, siendo estas últimas, variables que mediante procedimientos observacionales han permitido identificar posibles efectos y procesos de flujo. Las variables consideradas fueron:

- Caracterización de la distribución de velocidades en el cuerpo de agua.
- Flujo preferencial y otros fenómenos asociado a efectos de la obra.
- Cambios posibles que se consideren relevantes en la configuración arquitectónica y disposición de la obra.

3.4.6 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La bocatoma objeto de estudio está destinada para una central hidroeléctrica, con captación profunda desde una margen lateral. Consta de un barraje fijo, con captación inclinada. Y la toma se realiza por gravedad.

A continuación se detalla los elementos y características de la bocatoma. Se presenta además las medidas equivalentes al modelo físico entre paréntesis.

- Vertedero fijo (azud), de 12.8m (25.6cm) de alto y 19.5m (39cm) de largo, con perfil Creager.
- Tres compuertas radiales para la regulación del caudal y lavado, de 7m (14cm) de alto y 6m (12cm) de ancho.
- Compuerta radial que sirve para el lavado, de 5m (10cm) de alto y 4m (8cm) de ancho.
- Canal desripador o de lavado de 4m (8cm) de ancho, con una pendiente longitudinal del 4%, con una longitud de 80m (160cm) que desemboca aguas abajo de la obra.
- La captación que está formada por 3 ventanas de 3.9m (7.8cm) de alto, dos de estas tienen 5.85m (11.70cm) de ancho mientras que la tercera tiene 5.45m (10.9 cm) de ancho. La obra de captación está formada por una transición formada por 2 arcos de curva que va de un ancho de 18.75m (37.5 cm) (ancho total de la captación) a un ancho de 3.4m (6.8cm) que va al canal de conducción.
- Compuerta de regulación de caudal entre la captación y el canal de conducción, y detrás de esta se encuentra una chimenea de equilibrio.

- Canal de conducción que empieza con sección transversal cuadrada de 3.4m (6.8 cm) con 4.2m (8.4cm) de longitud por detrás de la chimenea, luego cambia de sección por la de un túnel en forma de herradura con un radio de 2m (4cm) y finalmente se conecta con la tubería de presión de 3.4m (6.8cm) de diámetro con una longitud proyectada de 5.5km que permitirá conducir 30 m³/s.

En la Figura 3.5 se muestra el modelo físico de la bocatoma empleado en el estudio. Para detalles más específicos de cada parte de la bocatoma revisar el Anexo A1.



Figura 3.5. Elementos de la Bocatoma

3.4.7 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En el Laboratorio de Dinámica de Fluidos del programa para el manejo del agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca se implementó el modelo morfológico del río Negro. A continuación se indica en resumen lo realizado para la construcción del modelo:

- Conformación del río Negro para posterior implantación de la obra de toma.
- Construcción de las obras de toma (azud, compuertas y tubería de conducción).
- Configuración la curva granulométrica depara el estudio.
- Calibración del cauce del río.

3.5 EQUIPOS Y LABORATORIO

El modelo fue emplazado en un canal de fibra de vidrio que tiene de ancho 5m, de alto 0.70 m y de longitud 15m, el cual consta de dos tanques que se encuentran ubicados en cada extremo, el primero en la entrada y el segundo en la salida del agua hacia el canal.

El tanque de entrada o de ingreso de flujo a la cabecera del modelo, tiene un ancho de 0.50 m, 1.5 m de altura y 5 m de largo, donde se colocó un vertedero de cresta delgada de 1.10 m de ancho para medir el caudal que esta entrado al modelo.

El tanque de salida o de almacenamiento tiene una forma diferente debido a que consta de dos compuertas las que se operan de forma manual, la parte inferior del tanque es rectangular con un 1 m de ancho, 0.40 m de altura y 5 m de longitud; por la presencia de las compuertas se tiene una parte del tanque de forma trapezoidal de 1 m de base mayor, 0.30 m de base menor, 0.70 m de altura y 5 m de longitud, quedando un espacio libre de 0.40 m, estas compuertas permiten regular los niveles tanto en el cauce del río Negro a la salida de la obra de toma, como en el que corresponde a la toma propiamente dicha en el modelo, el sistema de recirculación cuenta con una capacidad proyectada para el modelo de un volumen de recirculación de 8 m³.

El modelo posee una capacidad instalada de flujo de 80 lt/s, la bomba con la que se suministra el caudal tiene las siguientes especificaciones:

- **Marca:** Brook Crompton Parkinson Motors
- **Nº de Serie:** K826R
- **Potencia:** 15 KW
- **Voltaje:** 220 V
- **RPM:** 1740
- **Amperaje:** 53 A



Figura 3.6. Bomba del laboratorio del PROMAS

El sistema de recirculación posee en la succión un diámetro de 6 pulgadas, con válvula check, y la descarga se realizó mediante tubería de 4 pulgadas con un sistema de válvulas en paralelo para maniobrar el sistema a fin de controlar los caudales de flujo durante las diferentes etapas de experimentación. Es decir que al equipo hidromecánico mencionado se ha incorporado sistemas de controles electrónicos y de medición mismos que han sido adaptados y calibrados para lograr conseguir que se

simule a tiempo real en la proporción de la escala de modelo tanto hidrogramas, así como también otros caudales de interés.

3.5.1 EQUIPO COMPLEMENTARIO

Para el registro de variables y cambios en la morfología del terreno se ha empleado equipo adicional de entre los cuales se destacan los siguientes:

Trazadores: colorantes que se utilizaron para la visualización del flujo.

Balizas: varillas metálicas regladas empleadas para la medición de calados y como referencias para diversas mediciones.

Nivelación: equipo utilizado para la calibración de la pendiente del cauce del río.

Turbidímetro: este equipo mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua, y sirve para proporcionar una estimación de la concentración de TSS (Sólidos Totales en Suspensión).

El Turbidímetro empleado en las mediciones es de la marca WTW, es un aparato profesional avanzado para rangos de medición de hasta 10000 NTU y corresponde a la serie Turb® 555.



Figura 3.7. Turbidímetro

Este sistema de medición con 4 detectores no sólo permite mediciones nefelométricas (luz dispersa de 90°) y mediciones de transmisión, sino también mediciones de relación (método de relación) que reducen las interferencias causadas por la luz dispersa en el coloreado de las muestras.

- Intervalo de medición entre 0.0001 y 10000 NTU con función AutoRange
- Calibración automática en 1 – 5 puntos
- Indicación de los valores medidos en (NTU, EBC, UNF – UAF, Nefelos)
- Medición de flujo continuo

Granulometría: la granulometría de una base de agregados se define como la distribución del tamaño de sus partículas. Esta granulometría se determina haciendo pasar una muestra representativa de agregados por una serie de tamices ordenados, por abertura, de mayor a menor. La serie de tamices empleados para agregado fino son 710, 500, 355, 250, 180, 125, 90 y 63 μm .



Figura 3.8. Serie de Tamices

Hidrómetro: el método del hidrómetro fue utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz No. 200 (0.075 mm) hasta alrededor de 0.001 mm, también se utilizó para hallar la textura que es la cantidad relativa expresada en porcentaje de arena, de limo y de arcillas contenida en una fracción mineral del suelo, siendo:

- Arenas: Si sus tamaños son de 2.00 a 0.063 mm de diámetro.
- Limos: Si sus tamaños son de 0.063 a 0.002 mm de diámetro.
- Arcillas: Si sus tamaños son menores de 0.002mm de diámetro.

El principal objetivo del análisis de hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0.002 mm) cuando más del 12% del material pasa a través del tamiz No. 200. No es utilizada como criterio dentro de ningún sistema de clasificación de suelos y no existe ningún tipo de conducta particular del material que dependa intrínsecamente de la forma de dicha curva.



Figura 3.9. Hidrómetro

El análisis de hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido. Se empleó para la medición de las turbiedades de las muestras tomadas en las diferentes simulaciones.

3.6 MÉTODOS

3.6.1 CÁLCULO DE LA CARGA DE SEDIMENTO

De los resultados obtenidos referentes a la calibración del lecho, se fijó que las tasas obtenidas con la formulación de Nielsen resultaron las más adecuadas, en la Tabla 3.2 se muestra las tasas calculadas para diferentes caudales a ser analizados, las tasas para el prototipo corresponde a un tiempo de 1 segundo, es decir expresadas en *kg/s* mientras que las tasas para el modelo están consideradas para un tiempo de 10 minutos, porque resultan valores muy pequeños como para ser analizados en el modelo.

Caudal m ³ /s	Tasa (kg/s)	
	Modelo	Prototipo
50	51.90	1529.183
75	75.98	2238.660
89.7	89.89	2648.469
187.5	179.89	5300.127
280	262.96	7747.568
300	280.79	8272.722
400	369.49	10886.239

Tabla 3.2. Tasas de transporte de sedimento calculadas según el criterio de Nielsen (Beltrán & Ordóñez, 2012)

3.6.2 CRITERIOS DE INICIO DE SUSPENSIÓN

Para el análisis en el modelo se empleo como criterio de inicio de suspensión, la condición de (Julien, 1998), que se aplica para el caso de una carga dominante y que se produce cuando:

$$\frac{V^*}{w_0} > 2.5$$

3.6.3 MEDICIÓN DEL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN

Como se mencionó en la sección 2.1.3 la turbiedad está relacionada a la carga en suspensión, es por ello que con el fin de caracterizar el material que entra a la captación, se realizó muestreos en la zona de interés. Los muestreos se ejecutaron en dos puntos específicos en el modelo.

El primer punto se tomó frente a la captación. En este punto se tomaron muestras a diferentes alturas (por encima de la toma, en la toma propiamente dicha y por debajo de la misma), con el fin de determinar la distribución vertical de sedimento en suspensión. Mientras que el segundo punto es al final de la conducción. En la Figura 3.10 se muestran los puntos de medición.

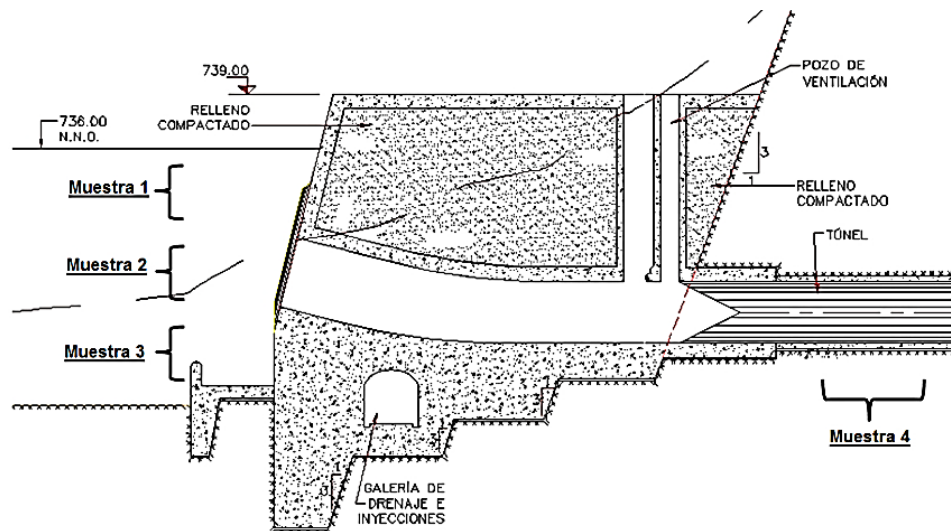


Figura 3.10. Puntos de recolección de las muestras en el modelo

De un estudio realizado por Pacheco (2008) se establecen relaciones entre la concentración de sólidos suspendidos en ríos de montaña a través de mediciones de turbidez.



<i>Turbiedad (T) y Concentración de sólidos suspendidos(SSC)</i>	
<i>Sitio</i>	<i>Ecuación Propuesta</i>
R. Turupamba	SSC = 0.0084T
R. Jadán	SSC = 0.0012T
R. Mapayacu	SSC = 0.0020T
R. Tabacay	SSC = 0.0001T
R. Cachiwayco	SSC = 0.0143T

Tabla 3.3. Relaciones entre Turbiedad y SSC (Pacheco, 2008)

De este estudio se desprende que para el caso del río Negro la ecuación que mejor describe su comportamiento para establecer la concentración de sedimentos en suspensión, es la correspondiente para el río Jadán, por su semejanza hidrológica y de transporte de sedimento. Pero, para el presente estudio, sobre la base de mediciones puntuales en el río Negro se realizaron pequeñas modificaciones al coeficiente de la ecuación, quedando expresado de la forma:

$$SSC = 0.00133 * T \quad (19)$$

Donde:

SSC: es la concentración de sólidos suspendidos, expresada en gr/lit.

T: representa la turbiedad de la muestra, expresada en NTU.



4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 COMPORTAMIENTO DE LA CAPTACIÓN

4.1.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL DESEMPEÑO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ASOCIADAS A LA BOCATOMA

La obra de captación configurada en el río Negro se considera como una bifurcación, la que se ve afectada por las ecuaciones de equilibrio, tanto para el gasto líquido como para el gasto sólido (ver sección 2.1.5). Para cumplir con el equilibrio del gasto líquido fue necesario determinar los coeficientes de descarga tanto para el vertedero de entrada al modelo, como para el azud y para las compuertas. Para ello se emplearon los coeficientes de descarga que se indican en la Tabla 4.1, para mayor detalle de los mismos, ver (Abril, 2012).

Elemento	Coefficiente de Descarga
Vertedero de entrada	2.10
Vertedero Fijo (Azud)	2.21
Compuerta de Lavado	0.60
Compuertas de Regulación	0.55

Tabla 4.1. Coeficientes de descarga

El funcionamiento de la bocatoma esta concebido de tal manera que siempre se capta $30 \text{ m}^3/\text{s}$, necesarios para la generación de energía, y en caso de que se presente una crecida, el azud está diseñado para descargar hasta m^3/s , por lo que si existe un caudal excedente se lo maneja mediante la operación de las cuatro compuertas.

La compuerta de lavado está diseñada para un máximo de $130 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando se encuentra abierta completamente, mientras que para las demás compuertas y la misma condición (abertura máxima) el caudal máximo es de $370 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1.2 PARÁMETROS DE FLUJO

Con el fin de establecer el desempeño de la captación, en términos de la hidráulica del flujo, se realizó una verificación de las condiciones existentes en el modelo físico, para ello se realizaron ensayos con los caudales de interés, para los cuales se consiguió verificar y obtener las diferentes velocidades para las diversas condiciones de operación de la bocatoma correspondientes. Estas velocidades son representativas al flujo longitudinal frente a la toma.

Las condiciones analizadas estuvieron basadas en el funcionamiento de la captación, del azud y de las compuertas, la primera condición se muestra en la Tabla 4.2, en la



que se analiza el flujo manteniendo todas las compuertas cerradas y evacuando el caudal de exceso sobre el azud.

Caudal Rio m ³ /s	Velocidad (m/s)		Caudal azud m ³ /s
	Modelo	Prototipo	
53	0.030	0.21	23
73	0.035	0.25	43
90	0.040	0.28	60
182	0.090	0.64	150
191	0.110	0.78	161

Tabla 4.2. Velocidades para modelo y prototipo con compuertas cerradas

En la Tabla 4.3 se observa la segunda condición analizada, para este caso se midieron las velocidades para diferentes condiciones de operación de las compuertas. Esta son: operando principalmente la compuerta de lavado, y para determinados caudales (superiores a 336 m³/s), con la operación de las compuertas de regulación, estas condiciones corresponden a caudales de crecida. Sin embargo debido a cuestiones del manejo de la bomba no se pudieron evaluar caudales mayores a los 403 m³/s.

Caudal Rio m ³ /s	Velocidad (m/s)		Caudal azud m ³ /s	Condición
	Modelo	Prototipo		
53	0.076	0.54	0	Abierta toda la compuerta de lavado
73	0.082	0.58	0	Abierta toda la compuerta de lavado
88	0.085	0.60	0	Abierta toda la compuerta de lavado
120	0.093	0.66	0	Abierta toda la compuerta de lavado
280	0.100	0.71	136	Abierta toda la compuerta de lavado
298	0.110	0.78	138	Abierta toda la compuerta de lavado
303	0.110	0.78	160	Abierta toda la compuerta de lavado
336	0.150	1.06	176	Abierta toda la compuerta de lavado
403	0.170	1.20	141	Abierta toda la compuerta de lavado y abierta la primera compuerta 2m

Tabla 4.3. Velocidades para modelo y prototipo con compuertas abiertas

De las mediciones de velocidades realizadas y analizadas en el embalse se tiene que, estas aumentan con respecto al caudal, como se ve en la Figura 4.1. Con esto se busca validar la correspondencia de la información alcanzada con el fin de exponer que los datos obtenidos en el modelo físico son válidos y confiables, cabe resaltar que en la gráfica se presenta solo la información procesada, es decir que se eliminaron puntos extremos que pudiera generar una tendencia distinta a la presentada.

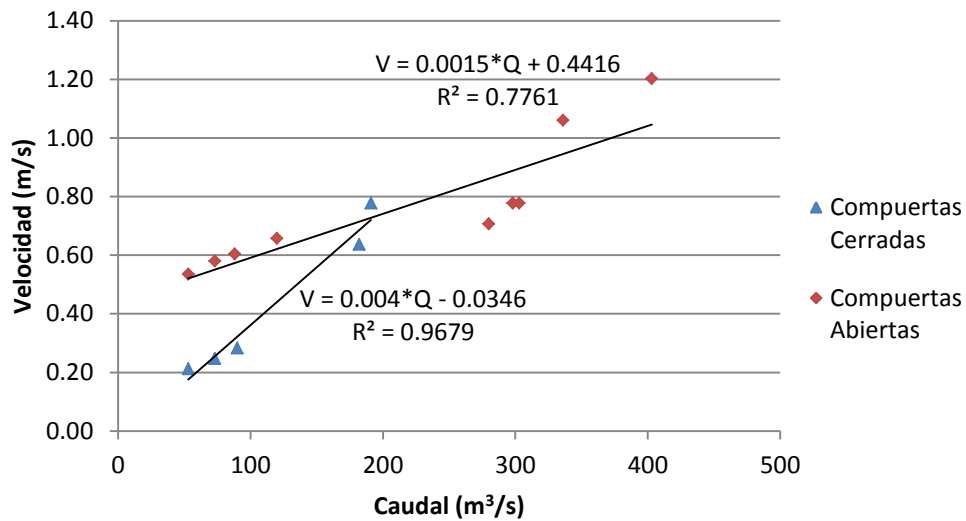


Figura 4.1. Relación de la velocidad frente a la toma en función del caudal

De todas las simulaciones realizadas se observó que el flujo en el embalse se puede dividir en cuatro zonas representadas a continuación en la Figura 4.2.

La zona 1 se la ha denominado zona muerta pues aquí la velocidad es alrededor de 0.1 m/s (velocidad en prototipo) y es ahí donde se deposita el material más fino. En la zona 2 se presentan velocidades desde 0.2 m/s para el caudal formativo y aumentan conforme aumenta el caudal en el río, alcanzando valores máximos de hasta 6 m/s (velocidad en prototipo). En la zona 3 se produce una distribución uniforme de velocidades hacia el azud. Finalmente en la zona 4 dependiendo del caudal en el río se produce una distribución no uniforme de velocidades.

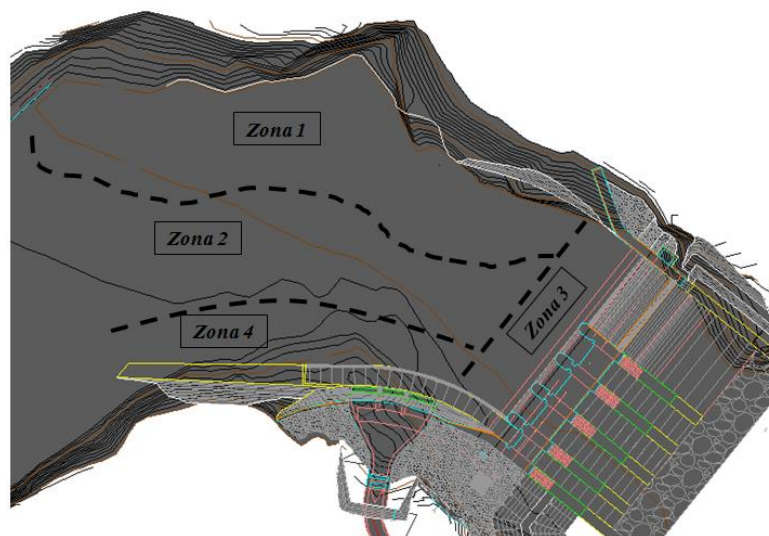


Figura 4.2. Zonas de flujo preferencial en el embalse

Para efectos de establecer el desempeño de la captación se analizó de manera más específica las zonas 3 y 4. Para determinar la distribución de velocidades en la zona 3 se realizaron los ensayos con las compuertas cerradas y con carga sobre el azud, para este caso el flujo se desarrolla como se observa en la Figura 4.3, representado por las flechas y el trazador, alterándose solo cuando se operan las compuertas ya sea de lavado o las de regulación. Como se puede observar este fenómeno se produce con el diseño original de las pilas y también cuando se las modificaron. Al mismo tiempo, para estas condiciones de funcionamiento de la bocatoma, se determinó la presencia de vórtices frente a la captación.



Figura 4.3. Flujo preferencial detrás de las compuertas

Con respecto al flujo en la zona 4, se estableció que se produce una distribución no uniforme de velocidades frente a la toma, que se vuelve más crítica en el modelo para caudales mayores a $180 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal de prototipo), teniéndose mayores velocidades con la operación de las compuertas. Además las velocidades que se midieron frente a la captación con caudales que van desde el formativo hasta $90 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal de prototipo) aproximadamente, se presentan hasta una distancia de 7.5m (en planta) separados de la captación, para el resto de caudales esta franja de influencia de velocidades, presenta variaciones que pueden llegar hasta los 20m .

Para la simulación con caudal de $191 \text{ m}^3/\text{s}$ se verificó un ancho de flujo (frente a la zona de toma) que varía de 10 a 15m , en este ancho se presentan diferentes velocidades; $V_1=0.49 \text{ m/s}$, $V_2=0.62 \text{ m/s}$ y $V_3=0.79 \text{ m/s}$ (ver Figura 4.4); las cuales varían de menor a mayor en lo ancho del flujo, esto efecto se produce cuando las compuertas están cerradas y el flujo se tiene preferencia sobre el azud, la máxima velocidad (V_3) se da a una distancia de aproximadamente de 15m (en prototipo) medido desde la entrada de la toma. Al momento de operar la compuerta de lavado, el flujo se altera y se presenta una sola velocidad de 0.82 m/s , en el ancho de flujo de 15m .

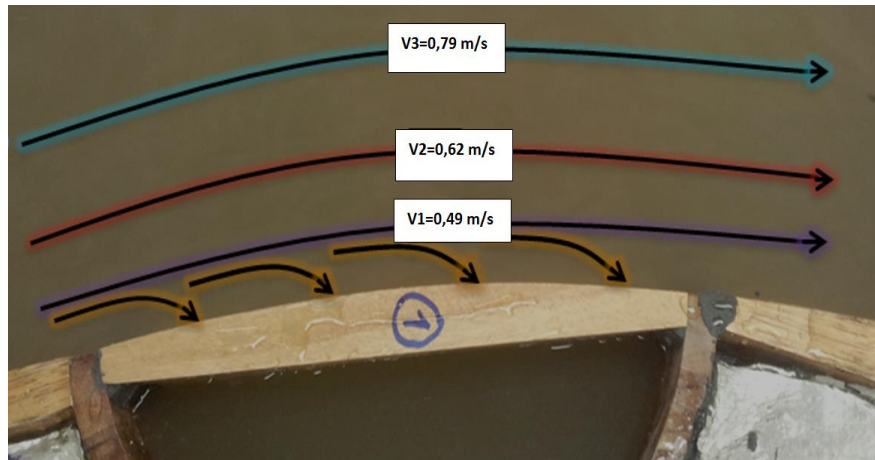


Figura 4.4. Distribución de velocidades para un caudal de 191 m³/s

El objetivo de este análisis fue encontrar la condición de funcionamiento más crítica de la captación. Esta condición, según los resultados obtenidos, se obtiene para la condición de abertura máxima de la compuerta de lavado y empieza el funcionamiento de las otras compuertas, ya que el flujo toma preferencia hacia a la compuerta de lavado, produciendo un lavado dentro de las ventanas de captación y a la vez generándose la máxima velocidad con caudales de crecida.

En la Figura 4.5 se observa la velocidad máxima (crítica) que se tiene cuando está abierta toda la compuerta de lavado para un caudal de 403 m³/s en el río, que es la máxima que se pudo ensayar para el modelo, por lo que se puede decir que para caudales mayores el patrón de flujo se replicaría.

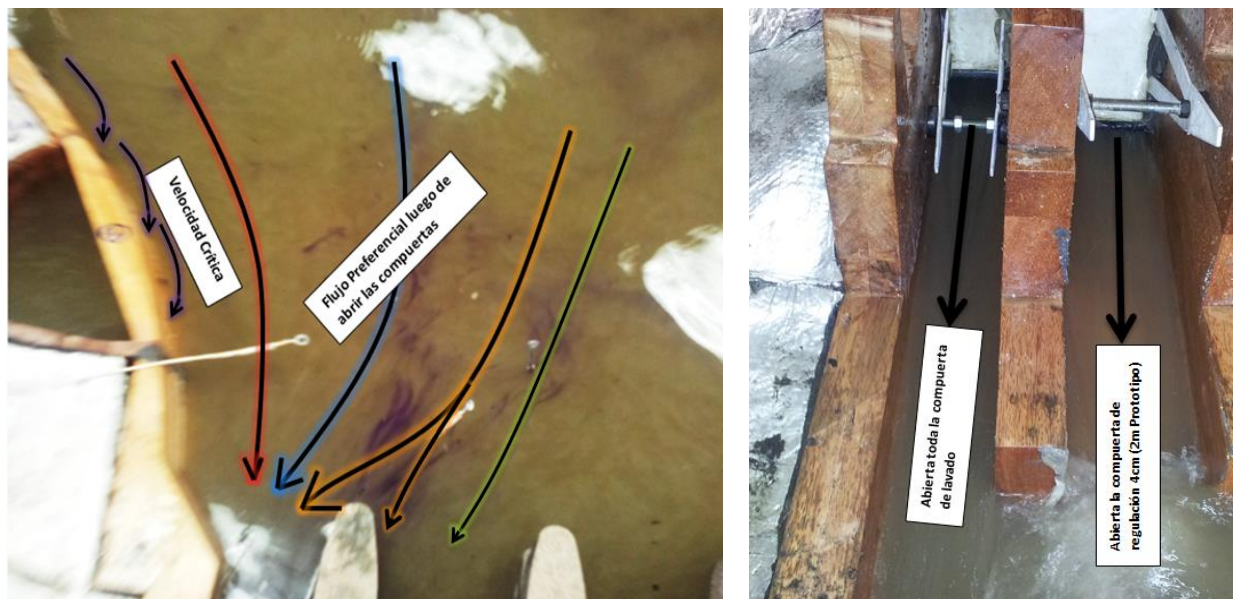


Figura 4.5. Velocidad máxima con funcionamiento de las compuertas

Adicionalmente, para el caudal de $403 \text{ m}^3/\text{s}$, se observó que, para la compuerta de lavado abierta completamente y la primera compuerta de regulación abierta 2m, el flujo frente a la captación se veía afectado, aumentándose el ancho de la franja de flujo así como también los valores de las velocidades y las direcciones de las mismas, (en un ancho de flujo de 15 a 20m).

Estas velocidades se presentan en la Figura 4.6 donde se observa la variación de velocidad entre: $V_1=1.24 \text{ m/s}$, $V_2= 1.43 \text{ m/s}$ y $V_3=1.25 \text{ m/s}$, produciéndose la máxima velocidad (V_2) en la mitad del ancho del flujo, debido a que el flujo toma preferencia hacia la compuerta de lavado evacuándose por ésta compuerta el máximo caudal.

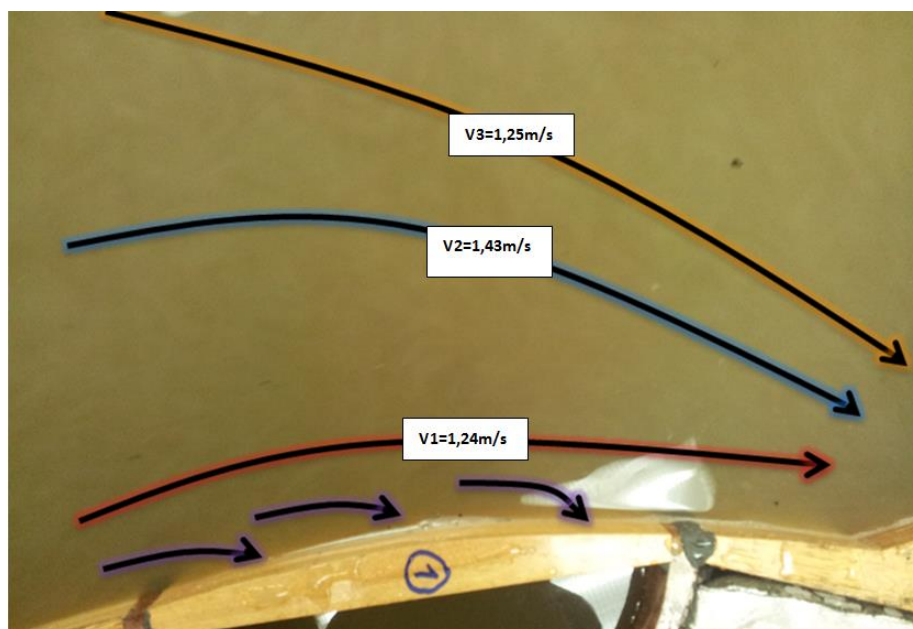


Figura 4.6. Distribución de velocidades para un caudal de $403 \text{ m}^3/\text{s}$

Debido a este fenómeno se generan vórtices frente a la toma los mismos que estarían introduciendo aire a la tubería de presión, a pesar de que a lo largo de ésta existan válvulas por donde puede escapar el aire, éste efecto genera una pérdida de sección de la tubería, afectando el suministro de caudal necesario para la generación hidroeléctrica.

Por lo observado en los ensayos realizados se puede decir que el flujo frente la toma, ya sea con compuertas abiertas o cerradas, tiende a formar vórtices intermitentes, los mismos que tienden a incrementar su fuerza cuando se comienza abrir las compuertas afectando mayormente la captación.

4.1.3 ANÁLISIS DE VÓRTICES

Se observó que para todas las simulaciones realizadas (con compuertas cerradas y abiertas) se produjeron vórtices en dos puntos específicos del sistema, alrededor de las pilas (compuertas) y frente a la captación (bocatoma), y que éstos incrementaban su tiempo de duración y fuerza con la presencia de material flotante de manera más marcada frente a la captación.

Se determinó que la causa del origen de los vórtices formados, obedecen a condiciones geométricas y a velocidades de flujo. Y de acuerdo al tipo de vórtice que se presente puede inducir aire y/o basura (material flotante), afectando de alguna manera el funcionamiento de la estructura.

Para analizar la influencia de los vórtices generados en la estructura es necesario clasificarlos. La Alden Research Laboratory, MA, U.S.A. establece el desarrollo de un vórtice en seis etapas, ver Figura 4.7, los cuales van de un simple remolino superficial hasta vórtices de gran fuerza en forma de embudo.

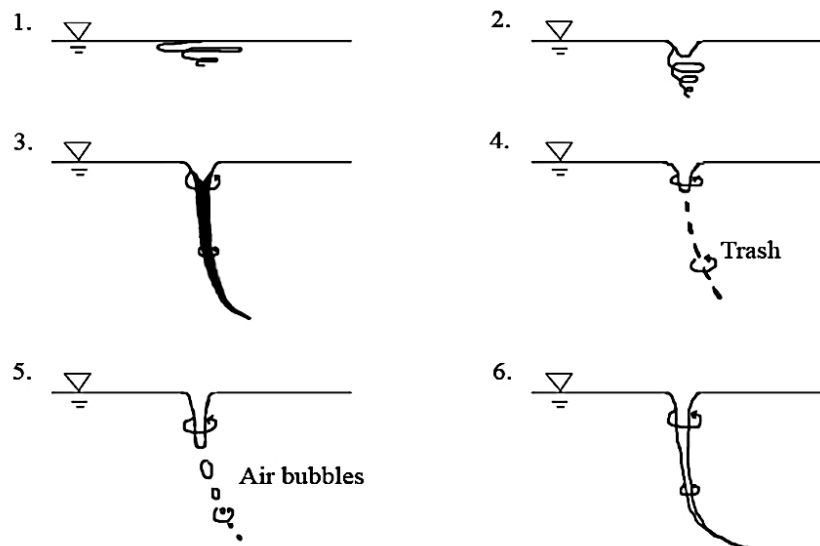


Figura 4.7. Tipos de Vórtices según Alden Research Laboratory (Makusa & Kiviniemi, 2009)

Los vórtices alrededor de las pilas se generaron con la operación cualquiera de las compuertas. Este fenómeno se produce cuando “las aguas profundas, situadas abajo de las compuertas cerradas, son arrastradas hacia la zona de flujo de aguas con velocidad elevada provenientes de la compuerta vecina abierta. El cizallamiento entre las dos masas de agua engendra vórtices, a lo largo de la superficie de contacto entre las dos corrientes” (Herrerías Espino, 2004). En la Figura 4.8 se puede verificar que los vórtices son del tipo 2 y 3.



Figura 4.8. Formación de vórtices alrededor de las pilas

Los vórtices en el área cercana a las pilas, genera vibraciones en la estructura las que pueden llegar a desestabilizar a la obra. Se ha establecido que la presencia de éstos obedece a aspectos de geometría de las pilas, por lo cual se planteó un rediseño de las mismas a fin de eliminar estos efectos. El rediseño de las pilas se presenta en el Anexo A2.

Con las modificaciones efectuadas a las pilas se observó la desaparición de los vórtices, sin embargo en simulaciones en las que se presentaba material flotante, nuevamente se observan vórtices que se presentan al momento de operar las compuertas, no obstante éstos son de muy poca duración y tamaño por lo que ya no se los considera de importancia, es decir que los vórtices corresponde al tipo 1 (Figura 4.9).

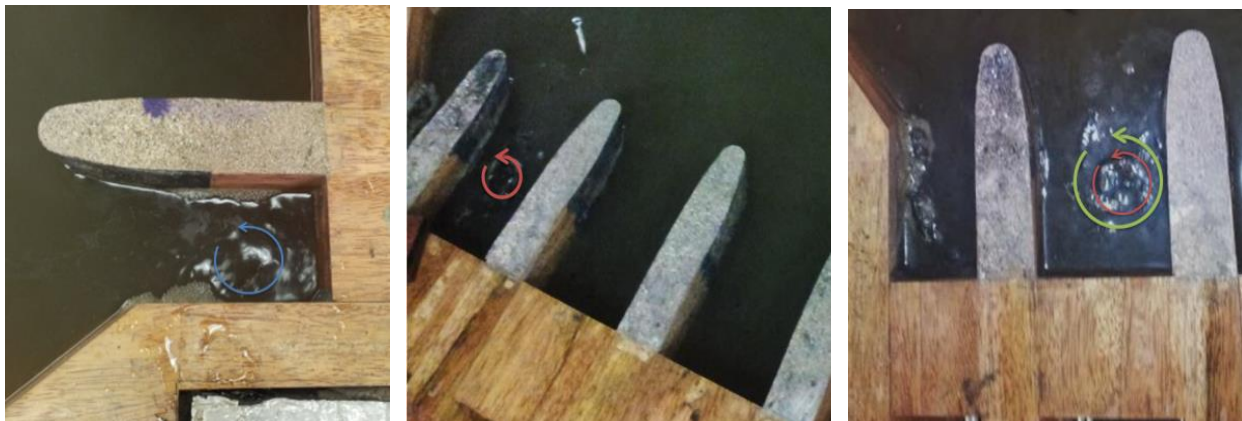


Figura 4.9. Vórtices Intermitentes en las pilas con el rediseño

Con respecto a los vórtices formados frente a la captación, se estableció que estos no se producen por aspectos arquitectónicos, sino más bien es debido al nivel de profundidad de las ventanas de captación.

Para prevenir la formación de vórtices fuertes, existe un nivel mínimo de operación recomendado para captaciones profundas, denominado profundidad crítica sumergida

Sc. La profundidad sumergida se define como la distancia entre la superficie de agua y la entrada de la captación, Figura 4.10.

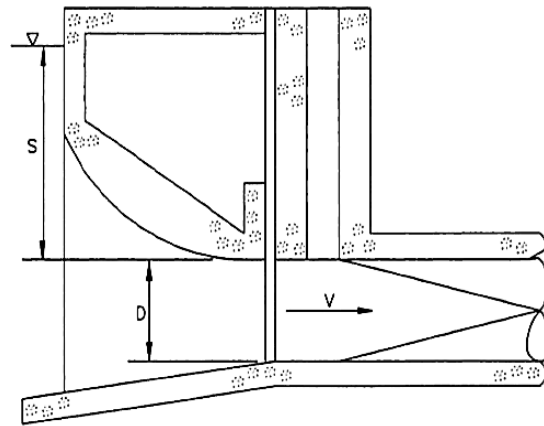


Figura 4.10. Profundidad sumergida en una captación (Makusa & Kiviniemi, 2009)

Existen expresiones dadas por diversos investigadores para determinar la profundidad de sumergencia, (ver Anexo A4), y puesto que la estructura tiene una compuerta de regulación detrás de la toma, se determinó la influencia de la abertura de la compuerta en el valor de Sc. Por efectos de comparar los valores obtenidos por las diferentes expresiones con el prototipo, se ha medido los valores de Sc con respecto al nivel normal y mínimo de operación del embalse, los mismos que están representados por las curvas naranjas en la gráfica. A continuación en la Figura 4.11 se presentan los resultados obtenidos.

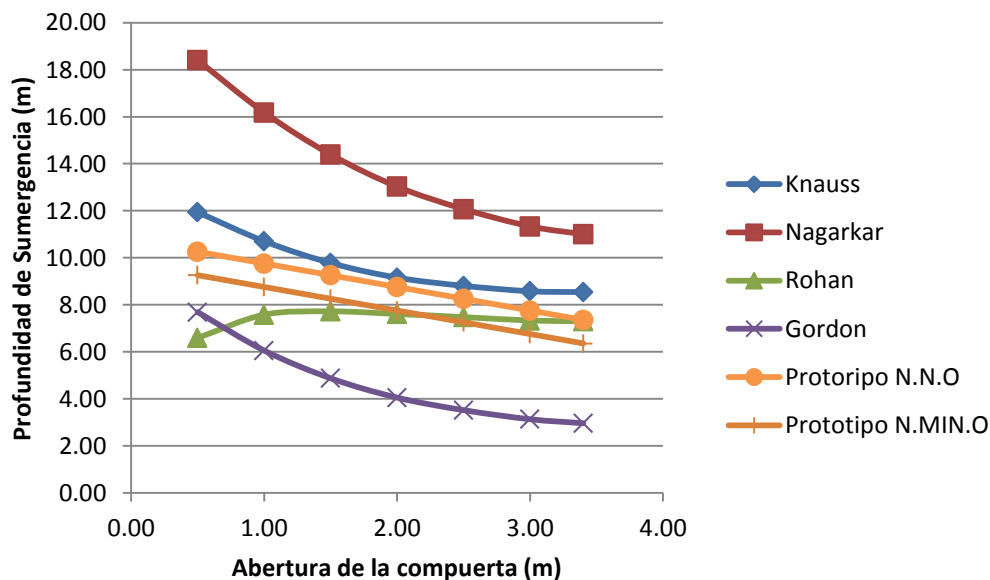


Figura 4.11. Variación de la profundidad de sumergencia en función de la abertura de la compuerta

Se determina entonces que para las ecuaciones de Knauss, Nagarkar y Gordon, el valor de Sc disminuye conforme se aumenta la abertura de las compuertas, mientras que para el caso de Rohan se mantiene relativamente constante. La expresión dada por Knauss se podría considerar como valor medio y criterio de diseño de entre todas las expresiones, por lo que si se compara con la curva del Prototipo se puede ver que se encuentra por debajo de los valores aconsejables. Esto justificaría la presencia de vórtices de baja fuerza y duración frente a la toma.

Todos los vórtices frente a la toma son horarios y se forman a una distancia que varía entre 6 - 12m, con un diámetro del remolino que varía entre los 25 – 35cm, además se ha establecido que el tiempo de duración de los vórtices es del orden de 10 segundos lo cual representaría en el prototipo tiempos del orden de una 1 hora, ver Figura 4.12, haciendo énfasis que en este escalamiento de tiempo se debe guardar las proporciones de comparación, dado que sería necesario incorporar otros factores que interfieren en el fenómeno.

En la mayoría de los casos de simulación analizados, los vórtices generados son de clase 1 y muy pocos son del tipo 2, es decir que se producen cuando se opera la compuerta de purga. Como los dos tipos de vórtices son considerados como seguros, no es necesario plantear estructuras adicionales para su eliminación.

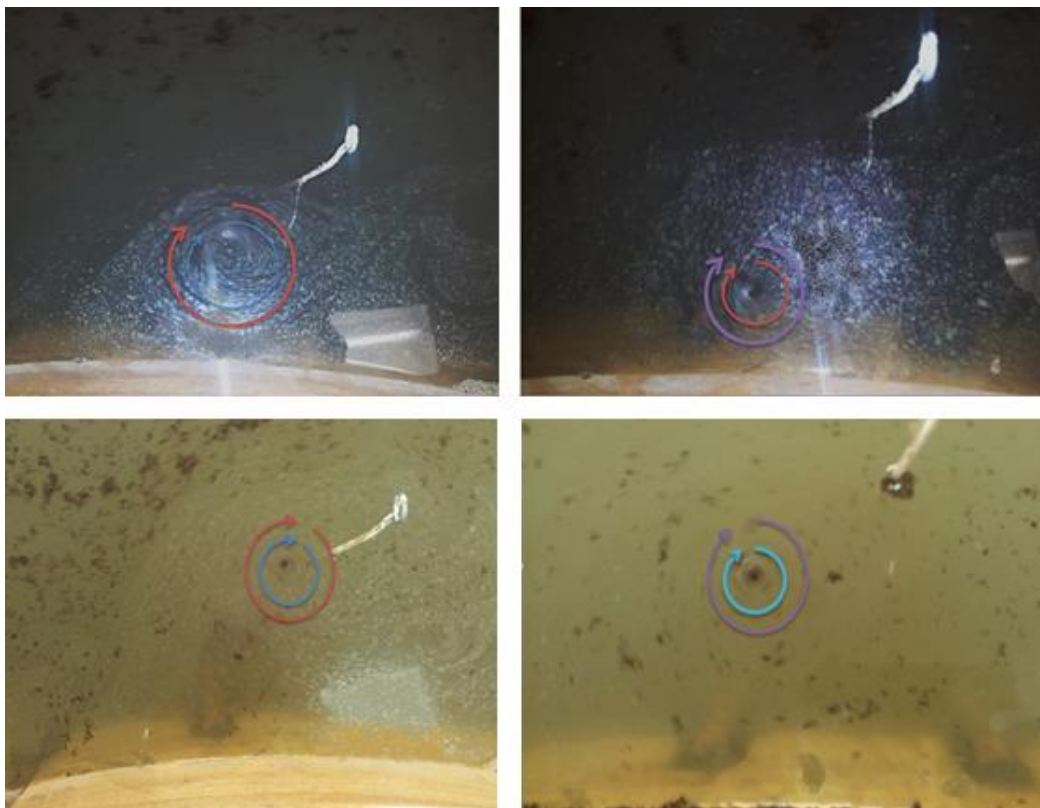


Figura 4.12. Vórtices frente a la bocatoma

Muchas investigaciones se han llevado a cabo para determinar una relación para Sc basada en estudios de prototipos y modelos físicos. Y se ha establecido que el incremento de la profundidad sumergida ayuda a prevenir la formación de vórtices pero no siempre es la solución más económica (Taghvaei, Roshan, Safavi, & Sarkardeh, 2012).

4.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE ACUMULACIÓN DE MATERIAL EN LA BOCATOMA

Existen varios parámetros que sirven para entender cómo se distribuyen los sólidos en una bifurcación, pero el de mayor importancia es la curvatura, ya que de esta depende la cantidad de sólidos que llegarían a la toma.

Para determinar la influencia de la curvatura se parte de una proporción de toma de 0.5, es decir para un caudal de simulación de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río y un caudal captado de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Como la derivación se encuentra en el margen interior de un tramo curvo, se puede predecir que prácticamente la totalidad del caudal sólido (Q_F) ingresaría al canal lateral, es decir que Q_{F1} estaría entre el 95 – 100% de Q_F .



Figura 4.13. Azolvamiento en canal de lavado y elevación del lecho

Como se observa en la Figura 4.13 en la toma se produce un azolvamiento de material, parte del cual es depositado en el canal de lavado. Este es el resultado de simulaciones con diferentes caudales y con alimentación de material desde la cola del embalse. Cabe mencionar que el nivel que alcanzó el material se ubica en la cota 725.46 m, es decir 2.55 m con respecto al fondo del canal de lavado, sin embargo se observó que este nivel es el máximo al que llegaría a azolvarse el material, puesto que con simulaciones posteriores no se presentaron cambios en la cota sino, que el material se lavaba con la operación de las compuertas.

El depósito de material que alcanza la cota indicada puede llegar a afectar considerablemente el funcionamiento de la toma. Por un lado el canal de lavado no trabaja a su capacidad total pues pierde longitud y sección transversal, y por el otro éste material puede entrar a la captación, llegando a las turbinas y afectando a las mismas.

Es por ello que se plantearon modificaciones tanto para el canal de lavado como para la toma, las variaciones consisten en aumentar el número y disminuir los anchos de las ventanas y trasladarlas hacia la compuerta de lavado, en tanto que para el lavado de material se planea aumentar el ancho de la compuerta de lavado, obteniéndose como resultado un diseño igual para todas las compuertas de 5.50 m de ancho, eliminándose el canal de lavado pues al modificar el ancho de la compuerta, ésta trabajaría de la misma manera que las demás. Las nuevas modificaciones se presentan en el Anexo A2.

Ya que la captación es profunda, no requiere de rejillas de entrada en las ventanas, pero en caso de mantenimiento, se debe realizar una limpieza superficial antes de vaciar el embalse, a fin de evitar que material flotante llegue a entrar a las ventanas de captación.

Se determinó además que la chimenea de equilibrio, necesaria para controlar las sobrepresiones y por estabilidad de la central, debe ser reubicada a una posición más distante de la compuerta de regulación.

Mientras que la bocatoma se encuentre trabajando con embalse lleno, existe una sedimentación del material en las ventanas de la captación, Figura 4.14(a), pero cuando la compuerta de purga se encuentre completamente abierta (es decir, cuando exista un vaciado rápido del embalse para caudales menores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$), se produce un lavado del material depositado en las ventanas (Figura 4.14(b)).



(a)



(b)

Figura 4.14. Material sedimentado en la captación



En las figuras anteriores se puede observar que existe material que ingresa a la captación y que un porcentaje de este llegará a las turbinas. De aquí la necesidad de analizar y caracterizar este material, que a lo largo del funcionamiento de la obra, ocasionarán erosiones a las turbinas.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN

Para el análisis de caracterización de sólidos sedimentables en la estructura de toma, se ha procedido con la determinación de concentraciones, velocidad de sedimentación (en reposo), diámetro equivalente de partícula, y tasa de transporte de material en suspensión.

4.2.1 TURBIEDAD Y CONCENTRACIONES MEDIDAS

En la Tabla 4.4 se muestra la turbiedad de las muestras analizadas y la concentración en kg/s , tanto para la captación como para el material que llegaría a las turbinas, se determinó mediante la ecuación (19), que relaciona la turbiedad con la concentración de sólidos suspendidos, para cada uno de los caudales de simulación analizados.

Caudal m^3/s	Turbiedad NTU		Tasa de Sedimentos en Suspensión (kg/s)			
	Captación	Turbinas	Captación		Turbinas	
			Prototipo	Modelo	Prototipo	Modelo
53	146.77	145.40	10.372	5.87E-04	10.275	5.81E-04
73	186.66	184.05	18.168	1.03E-03	17.915	1.01E-03
90	193.77	185.40	23.252	1.32E-03	22.248	1.26E-03
191	201.78	188.05	51.387	2.91E-03	47.890	2.71E-03
280	255.27	240.69	95.301	5.39E-03	89.859	5.08E-03
303	256.80	255.14	103.746	5.87E-03	103.075	5.83E-03
403	311.31	309.83	167.275	9.46E-03	166.480	9.42E-03

Tabla 4.4. Tasa de sedimentos en suspensión en la captación y en las turbinas

En la Figura 4.15 se puede ver que las turbiedades de las muestras tomadas tanto para la captación como para las turbinas tienen la misma tendencia para los diferentes caudales. Además los valores presentados en la gráfica y la tabla corresponden a



valores promedio de 3 muestras analizadas en el turbidímetro para cada caudal muestreado.

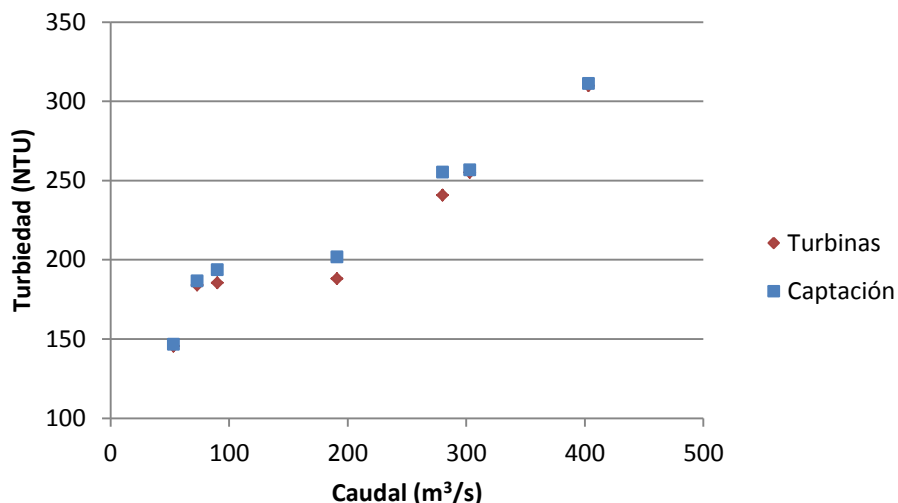


Figura 4.15. Variación de la turbiedad en función del caudal

En la Figura 4.16 se muestra la pequeña variación que existe entre la concentraciones que estarían en la captación y las que llegarían a las turbinas, pero las dos tienen la misma tendencia, por lo que se puede asumir que son iguales, es decir que la misma proporción de material que entra por la captación llegaría a las turbinas.

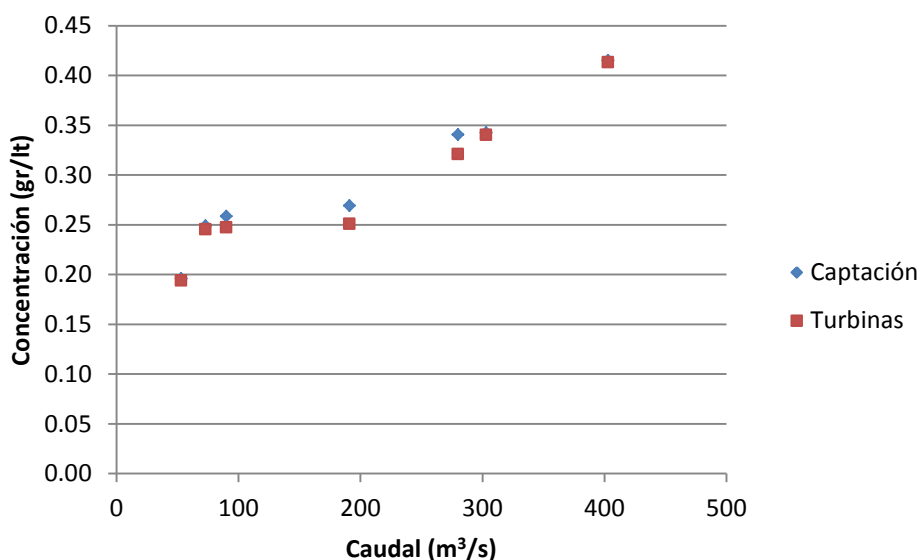


Figura 4.16. Variación de la concentración de sedimentos en la captación y en la tubería



Además de las muestras tomadas frente a la captación, se puede ver en la Figura 4.17 que la distribución vertical de concentraciones no se asemeja a las curvas teóricas, esto es debido a que la escala del modelo resulta ser muy pequeña como para que sea apreciable la variación de concentraciones, sin embargo se cumple la condición de que la concentración aumenta con la profundidad.

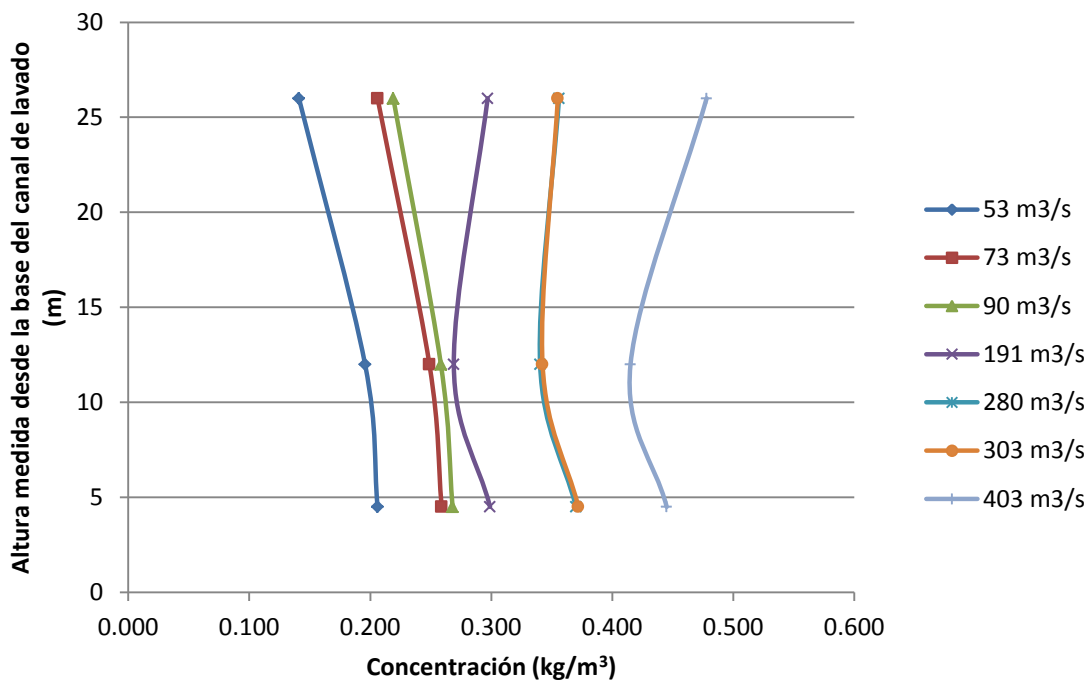


Figura 4.17. Distribución de concentraciones de sedimentos frente a la captación

Finalmente conociendo las concentraciones para los diversos caudales tanto en el embalse como aguas arriba del mismo y en la captación, se determina la relación del material captado por la toma, en relación con la concentración de material en la cola del embalse. Para esto no se ha considerado el valor correspondiente para 53 m³/s debido a que la velocidad en el embalse es de 0.2 m/s, aumentando la velocidad de sedimentación del material, además el flujo toma preferencia frente a la toma para este caudal, afectando de esta manera las muestras tomadas en esos puntos. Como se detalla en la Tabla 4.5 el porcentaje captado de material se encuentra entre el 85 – 100% de Q_F, con lo que se comprueba que en dirección de la toma se acumula el material.

Caudal	Tasa de Sedimento en Suspensión	Porcentaje
--------	---------------------------------	------------



(kg/s)				
m^3/s	Cola del Embalse	Embalse	Captación	%
53	8.88	7.47	10.37	-----
73	19.00	15.02	18.17	95.61
90	25.45	19.69	23.25	91.38
191	60.35	56.68	51.39	85.14
280	102.47	99.75	95.30	93.01
303	113.44	107.62	103.75	91.46
403	165.66	192.83	167.28	100.00

Tabla 4.5. Porcentaje captado en la toma en la relación a la tasa en la cola del embalse

Como se observa en la Figura 4.18 la tasa de sedimento en suspensión aguas arriba del embalse es relativamente igual que en la captación y estas son mayores a la del embalse, para caudales menores a $100 m^3/s$ esto se justifica en el hecho de que para estos caudales la velocidad en el embalse es de $0.3 m/s$ y parte del material es descargado por el azud. Para caudales entre 100 y $300 m^3/s$ las tasas se mantienen relativamente constantes en los tres puntos aunque en la toma es ligeramente menor por lo que no todo el material es atrapado por la captación, ya que por detrás del azud se encuentra una zona muerta en donde se deposita el material más fino. Para caudales mayores a $300 m^3/s$ el material captado resulta menor al del embalse debido a que para estos caudales es necesario operar las compuertas por lo que el flujo se vuelve preferencial hacia éstas con velocidades superiores a $0.8 m/s$ con lo que el material es lavado y transportado aguas abajo del embalse. Con respecto a la concentración del embalse se puede determinar que el material que existe en todo el embalse es mayor al material captado.

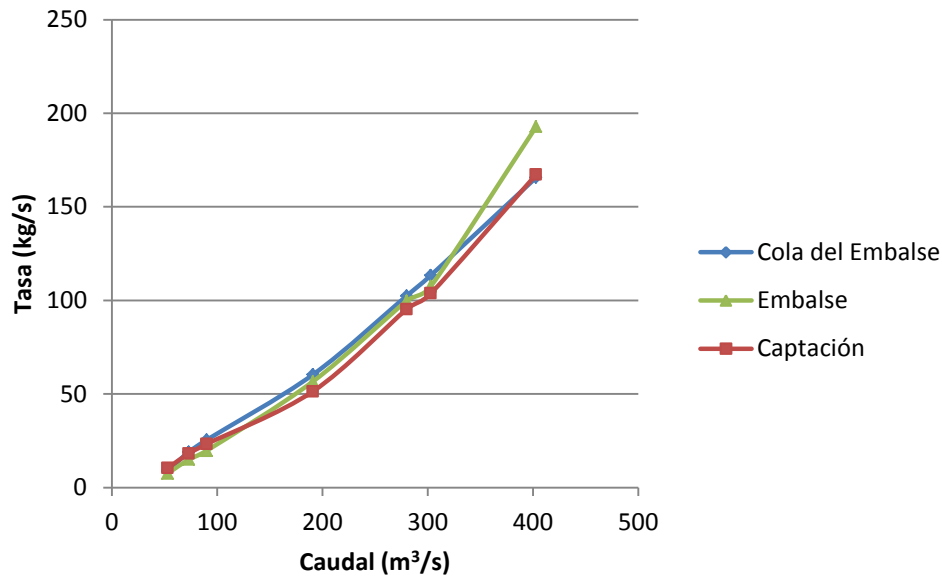


Figura 4.18. Relación de tasas de sedimento en suspensión en la cola del embalse, en el embalse y la captación

4.2.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Una vez realizados los ensayos con las tasas de sedimento se tomaron muestras del material depositado en la captación, bajo esta y del material que llegaría a las turbinas. De estos depósitos se obtuvieron las granulometrías que se muestran a continuación en la Figura 4.19, en la Figura 4.20 y en la Figura 4.21, las mismas que representan las granulometrías tanto en el modelo como en el prototipo.

Captacion		
Dm	Dp	Pasa
mm	mm	%
0.7100	23.4885	99.50
0.5000	13.9676	98.66
0.3550	7.5752	96.70
0.2500	3.4857	94.17
0.1800	1.4779	91.04
0.1250	0.5779	79.42
0.0900	0.3041	60.14
0.0630	0.1845	36.54
0.0578	0.1658	12.97
0.0239	0.0652	6.49
0.0070	0.0189	0.00
0.0049	0.0133	0.00
0.0014	0.0038	0.00

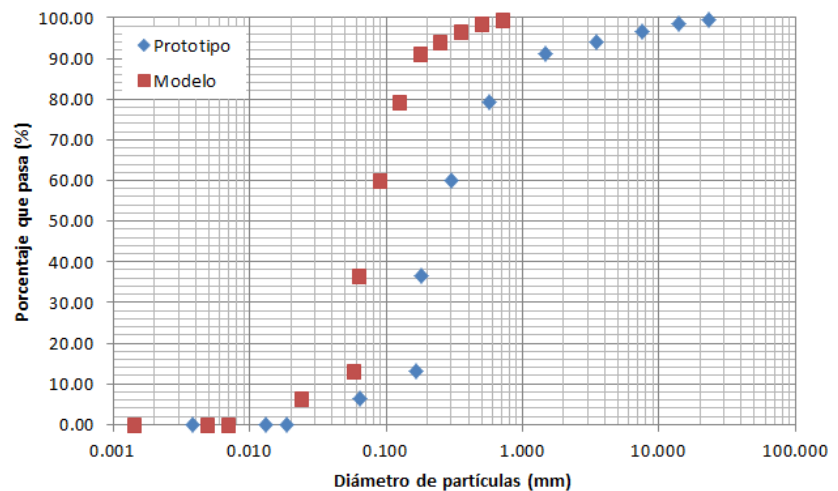


Figura 4.19. Granulometría del material de la captación (Muestra 2, Figura 3.10)

Bajo la Toma		
Dm	Dp	Pasa
mm	mm	%
0.7100	23.4885	98.55
0.5000	13.9578	97.07
0.3550	7.5802	94.75
0.2500	3.4857	92.52
0.1800	1.4779	90.28
0.1250	0.5779	80.63
0.0900	0.3041	62.83
0.0630	0.1845	41.12
0.0583	0.1668	4.55
0.0241	0.0662	0.00
0.0049	0.0132	0.00
0.0028	0.0097	0.00
0.0014	0.0038	0.00

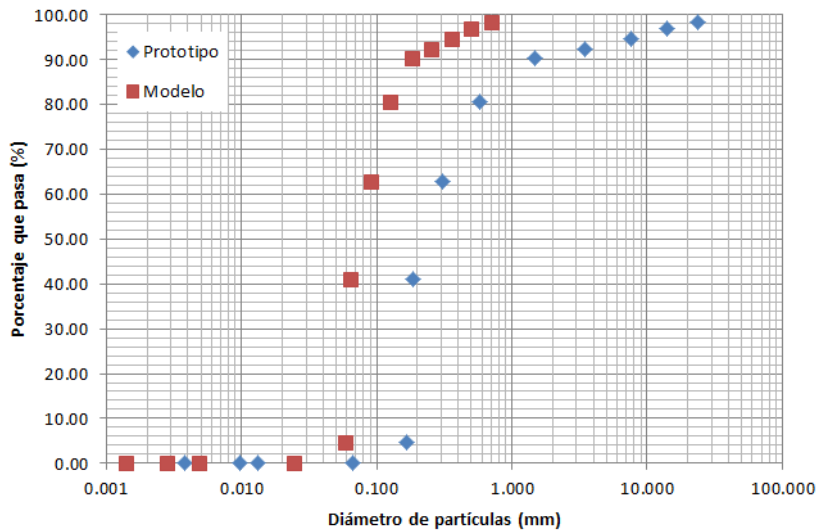


Figura 4.20. Granulometría del material bajo la captación (Muestra 3, Figura 3.10)

Turbinas		
Dm	Dp	Pasa
mm	mm	%
0.7100	23.4885	94.11
0.5000	13.9368	89.36
0.3550	7.5702	81.41
0.2500	3.4857	72.81
0.1800	1.4694	68.10
0.1250	0.5739	62.63
0.0900	0.3041	51.60
0.0630	0.1845	37.94
0.0533	0.1508	30.02
0.0220	0.0562	28.35
0.0067	0.0190	11.51
0.0048	0.0132	6.67
0.0014	0.0041	0.17

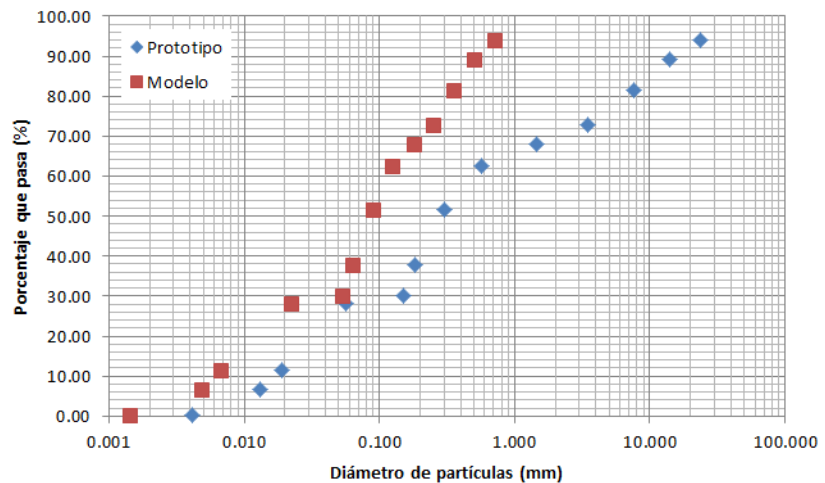


Figura 4.21. Granulometría del material de las turbinas (Muestra 4, Figura 3.10)

De las granulometrías obtenidas en los puntos muestreados se determinan los diferentes diámetros y parámetros de caracterización para definir al material, como se ve en la Tabla 4.6, se presentan los diámetros en el modelo. Para el caso de la captación y debajo de ésta de acuerdo a los valores obtenidos de S y σ_g estas granulometrías presentan una distribución casi uniforme, a diferencia de la granulometría obtenida para el material de las turbinas, esto se debe a que el punto de



recolección de esta muestra se tomó en uno de los tanques del modelo, lugar en el que el material es susceptible de ser modificado.

Diámetros Obtenidos (μm)	Captación (Muestra 2)	Bajo la Captación (Muestra 3)	Turbinas (Muestra 4)
d_{90}	175.07	178.41	528.49
d_{84}	146.68	144.22	402.30
d_{50}	78.40	74.05	86.84
d_{16}	58.43	59.80	10.79
d_{10}	42.22	59.03	6.11
S	2.04	1.74	9.30
σ_g	1.58	1.55	6.11
Coef. de Gradación	1.61	1.59	6.34

Tabla 4.6. Diámetros obtenidos de las granulometrías

Sin embargo de los valores obtenidos solo se tomara en cuenta el d_{50} ya que es el diámetro característico para describir el comportamiento de la partícula. (Ver Tabla 4.7)

Diámetro Característico	Modelo mm	Prototipo mm
Captación	0.078	0.247
Bajo la Captación	0.074	0.228
Turbinas	0.087	0.288

Tabla 4.7. Diámetro característico obtenido en la captación

Se considera que los diámetros característicos en los tres puntos analizados resultan ser del mismo tamaño, y en promedio el diámetro característico es de 0.255 mm lo que significa que éste sería el diámetro que estaría entrando a la toma y posiblemente alcanzando a las turbinas.

De un aforo realizado en el río Negro se obtuvo la granulometría de finos para un caudal pico de $280 \text{ m}^3/\text{s}$ cuya granulometría se muestra en la Tabla 4.8, al ser comparada con la obtenida en el modelo (es decir escalada) se puede observar en la Figura 4.22 que el d_{50} del río Negro es menor al diámetro obtenido en el modelo físico (0.186 mm con respecto a 0.255 mm); adicionalmente para esta misma muestra se midieron los valores de las turbiedades, las cuales estaban alrededor de 73 NTU, mientras que las turbiedades ensayadas en el modelo para el mismo caudal fueron de



255 NTU, lo que implica que se modelaron condiciones mas desfavorables de las que se podrían esperar en el río, lo que representaría un 37.1% mas desfavorable en términos del diámetro característico.

Abertura tamiz (µm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (gr)	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa (%)	Tipo de Material
1000	0.094	0.094	1.50	98.50	cuarzo, feldespato, moscovita y mica
500	0.166	0.260	4.15	95.85	
250	0.518	0.778	12.42	87.58	Arena fina y otros
125	4.634	5.412	86.37	13.63	
63	0.779	6.191	98.80	1.20	Arena fina
—	0.075	6.266	100.00	0.00	

Tabla 4.8. Granulometría del río Negro para un caudal pico de 280 m³/s (Pacheco & Carrillo, 2012b)

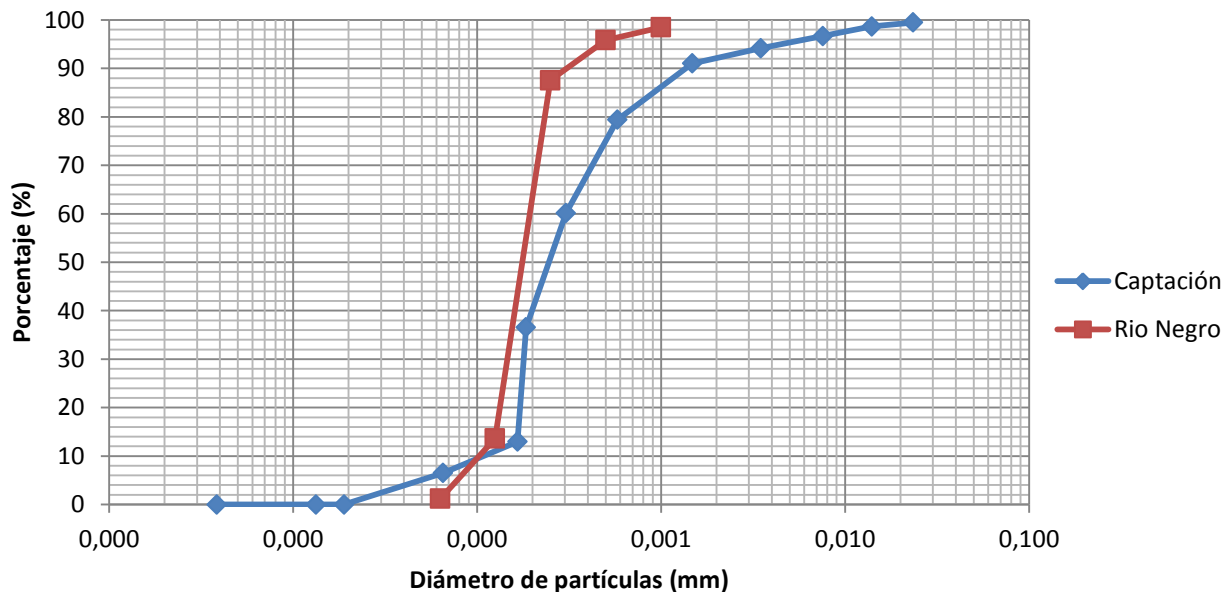


Figura 4.22. Granulometría río Negro y material obtenido en el modelo

Por lo tanto el diámetro característico del material que estaría entrando a las turbinas sería de 0.255 mm, el cual no afectaría a las estructuras, pero de manera principal a las turbinas. Esto principalmente basado en el hecho de que, según Lysne, Glover, Stole, & Tesaker, 2003, partículas mayores que 0.3 a 0.4 mm pueden causar daños severos a las turbinas. Por consiguiente los parámetros característicos para las partículas de este diámetro serían los que se muestran en la Tabla 4.9. El valor de la viscosidad



cinemática para el río Negro, se consideró para una temperatura de 16°C, por ser la temperatura característica del río.

Diámetro de la partícula	d_s	0.255	mm
Gravedad específica	s	2.64	
Viscosidad cinemática (16°C)	ν	1.12E-06	m ² /s
Velocidad de sedimentación de partícula	w_o	0.034677	m/s
Coefficiente de arrastre	C_d	4.54	
Número de Reynolds	Re	7.89	

Tabla 4.9. Parámetros de la partícula obtenida en la captación

La información de los hidrómetros, realizados a las muestras recopiladas, nos permite clasificar el material como se detalla en la Tabla 4.10 y determinar el porcentaje presente de cada categoría según su diámetro.

Material	Rango de tamaño	Porcentaje
Arena	63 < d_s < 2000 μm	61.75%
Limo	2 < d_s < 63 μm	38.25%
Arcilla	d_s < 2 μm	0.00%

Tabla 4.10. Clasificación del material según el método del hidrómetro

Adicionalmente se realizó una clasificación (análisis granulométrico y tipo de material) del material más grueso (mayor a 63 μm) que representa el 61.75% de la muestra. Los resultados de este análisis se presentan a continuación en la Tabla 4.11.

Tamiz Abertura μm	Wret gr	Wret acum gr	Retenido %	Ret Acum %	Pasa %
710	0.16	0.16	0.50	0.50	99.50
500	0.28	0.44	0.84	1.34	98.66
355	0.64	1.08	1.96	3.30	96.70
250	0.83	1.91	2.52	5.83	94.17
180	1.03	2.94	3.13	8.96	91.04
125	3.81	6.75	11.62	20.58	79.42
90	6.32	13.08	19.28	39.86	60.14
63	7.74	20.82	23.60	63.46	36.54
Fondo	11.99	32.81	36.54	100.00	0.00

Tabla 4.11. Análisis granulométrico



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Una vez determinado el diámetro característico del material que entra a la toma y conocidas sus características se puede determinar a partir de la Figura 2.9 (sección 2.1.5) la relación de sedimentos que pasarían a la bifurcación, sabiendo que Q_1 siempre será $30 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Tabla 4.12 se puede ver que la relación de caudal de sólidos que entra a la bifurcación con el caudal total de sólidos, Q_{F1}/Q_F , disminuye con respecto al caudal en el río. Cabe mencionar que estas relaciones son teóricas para una bifurcación, por lo que su aplicación permite tener solo una aproximación de lo que ocurriría para el caso de un embalse.

Caudal m^3/s	Parámetro (α)	Q_1/Q	Q_{F1}/Q_F
53	0,76	0,57	0,65
73	0,73	0,41	0,57
88	0,74	0,34	0,48
90	0,74	0,33	0,47
191	0,70	0,16	0,19

Tabla 4.12. Relación de sólidos captados en función de la relación de toma



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado la investigación en modelo físico a escala reducida para la estructura de toma perteneciente al proyecto hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO, el mismo que ha permitido obtener el desempeño de la obra desde el punto de vista hidráulico y de procesos de flujo asociados a concentración de sedimento en suspensión.

La elaboración de modelos físicos es de suma importancia cuando existe incertidumbre acerca del comportamiento de la estructura ante condiciones para las cuales la teoría se encuentra insuficientemente desarrollada, como es el caso de los procesos que influyen en el desempeño de una bocatoma.

El desempeño de la captación, no se lo puede determinar a partir de la simulación o consideración de un único evento, sino que resulta de la combinación de una serie de factores y de las distintas variables que intervengan en el sistema.

El funcionamiento hidráulico de la bocatoma se ha comprobado con ciertas modificaciones al diseño original. Estas modificaciones han sido coordinadas conjuntamente con el diseñador de la obra.

La curvatura del canal y la ubicación de la toma con respecto a ella tienen una gran importancia para impedir el ingreso del material sólido. La ubicación más favorable corresponde a la iniciación del tramo en curva en su margen exterior. Se insiste que, en lo posible no debe ubicarse la toma en la margen interior, sin embargo para este proyecto no ha sido posible cumplir esta condición.

Cuando sea necesario ubicar la toma en una curva del río, se debe elegir el tramo cóncavo para no estar sujeto a la sedimentación, pues es más fácil protegerse de la socavación que de la sedimentación.

En una obra de captación la sedimentación o azolvamiento puede reducir su capacidad de captación y permitir el mayor paso de sedimentos a la obra de conducción, disminuyendo así su capacidad operativa. Por ello se plantearon modificaciones al diseño como la ubicación de la toma, colocándola más cercana a la compuerta de purga.

El método experimental, con base en modelos, es altamente recomendable para el mejor conocimiento del comportamiento sedimentológico en una bifurcación.

La presencia de vórtices en estructuras hidráulicas es un fenómeno indeseable, debido a que afectan el funcionamiento de la obra, disminuyendo su rendimiento e inclusive llegando a destruir la obra o maquinaria.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Se estableció que en el embalse se producen cuatro zonas de flujo preferenciales en las que se presentan velocidades que van desde 0.1 m/s (0.014 m/s en modelo), por detrás del azud, hasta 1.43 m/s (0.20 m/s en el modelo) en dirección a la compuerta de lavado, siendo esta velocidad la más crítica para un caudal de 403 m³/s. Esta distribución de velocidades, ya sea con compuertas abiertas o cerradas, tiende a formar vórtices intermitentes, los mismos que tienden a incrementar su fuerza cuando se comienza abrir las compuertas afectando mayormente la captación.

Los vórtices que se presentaron en las pilas, inducían aire y basura al interior de los mismos, produciendo erosiones en el cauce y vibraciones a la estructura que podían afectar su estabilidad gravemente. Estos vórtices sin embargo obedecían a aspectos arquitectónicos y la medida correctiva empleada para su eliminación consistió en su rediseño, cambiando su inclinación de 90 a 105°.

La profundidad de sumergencia empleada para el diseño de la toma se podría decir que es la adecuada, ya que a pesar de que se forman vórtices superficiales frente a la toma, estos son del tipo 1, es decir que son vórtices poco desarrollados y no inducen a la toma aire ni tampoco basura flotante. Para su eliminación completa se podría aumentar la profundidad de sumergencia, sin embargo no es adecuado económicamente, por lo que existen estructuras para eliminar los vórtices. En un estudio en modelo físico para captaciones horizontales y profundas se plantearon placas horizontales, paredes verticales y estructuras en forma de cuña como medidas para su eliminación, sin embargo no todas las captaciones tienen las mismas condiciones y es por esto que se debería plantear el estudio de estas alternativas.

Para minimizar o eliminar el efecto vórtice de superficie libre o de toma, se recomienda:

- Aumentar el nivel de profundidad de la toma a valores por encima de los límites críticos que causan la formación del vórtice.
- Eliminar los flujos no uniformes, reduciendo el origen de la fuente de vorticidad y la formación de vórtices superficiales.
- Proporcionar los dispositivos de extinción de vórtices.

La eliminación de flujos no uniformes se puede obtener mediante la modificación de la geometría o dispositivos de pérdida de carga tales como pantallas o rejillas.

Es de suma importancia en embalses caracterizar el material que entrará a la toma, mas aún en este caso en el que el diseño no contempla la construcción de un desarenador, estructura que sirve para sedimentar la mayor cantidad de partículas a fin de que estas no pasen a la tubería de presión, además que no contempla rejas de entrada que sirven para retener material grueso que pudiera pasar a la conducción.

El material que entra a la captación puede generar desgaste y erosión en las turbinas. La erosión se produce por el impacto de partículas que transporta el agua sobre las paredes de los álabes. Esto tiene graves consecuencias como el elevado costo de



mantenimiento. Y en un determinado período de tiempo, también afectará la eficiencia de la turbina y consecuentemente reducirá la producción de energía.

En el modelo se ha trabajado con rangos de turbiedades que van desde 125 a 360 NTU, las que representan en el prototipo, tasas de sedimento en suspensión en el rango de 8 a 200 kg/s. Esto para caudales que van desde el formativo hasta un máximo alcanzado (en el modelo) de 403 m³/s.

Las curvas obtenidas de la distribución vertical de concentraciones frente a la toma no se asemejan a la curva teórica, esto se debe a la escala del modelo resulta pequeña para analizar este efecto en el embalse. Sin embargo se demostró que la concentración de sedimentos aumenta con la profundidad aunque la diferencia de concentraciones entre la ventana de captación y debajo de esta son insignificantes para caudales menores a los 100 m³/s.

De un aforo realizado en el río Negro para un caudal de 89.7 m³/s y un pico instantáneo de 280 m³/s se determinó que la turbiedad para esas muestras estaba alrededor de 73 NTU. De las simulaciones realizadas en el modelo físico se llegó a tener turbiedades de hasta 310 NTU con lo que se planteó en el modelo condiciones mucho más desfavorables a las que presenta el río y los resultados en estas condiciones extremas dieron resultados favorables a lo que se refiere al diámetro del material captado. Con lo que se puede decir que en la captación del río Negro entrarán diámetros menores o iguales a 0.255mm.

Para el proyecto era de especial interés evaluar condiciones para material con diámetro de 0.3mm entre a la toma, debido a las erosiones que éste causaría a las turbinas, sin embargo de la caracterización del sedimento se obtuvo que el diámetro que se captará es del orden de 0.255mm, y material como cuarzo y feldespato son sedimentables, por lo que estos no pasarán a la captación y se depositan en el embalse.

Se recomienda para la bocatoma la implementación de una trampa de material grueso, como gravas, en la cola del embalse a fin de evitar que este material llegue a la captación pudiendo dañar el funcionamiento del sistema. Además de la implementación de un desarenador si se considera necesario evitar que diámetros menores a 0.255mm lleguen a las turbinas.

Una vez analizados las diferentes simulaciones realizadas en el modelo se puede decir que no existirán problemas de colmatación o azolvamientos de grandes volúmenes en el embalse, para todos los caudales ensayados se pudo ver que la compuerta de lavado y las compuertas reguladoras sirven para lavar el sedimento que se azolva por detrás de las compuertas. Sin embargo en caso de ser necesario se pueden adoptar medidas correctivas con el fin de alargar la vida del embalse (Rocha, 1998) establece las siguientes medidas correctivas según las características del embalse:

- Controlar la erosión en la cuenca, mediante acciones de preservación.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Disponer de un volumen adicional muy grande reservado para el depósito de sólidos.
- Incorporar a la presa sistema de purga.
- Construir aguas arriba presas para la retención de los sedimentos.
- Remover mecánicamente los sedimentos.

Se recomienda para el estudio de sedimentos en suspensión, la implementación de un programa de monitoreo que permita la generación de datos en un periodo de registro suficiente para futuros estudios que ayuden a determinar de mejor manera las relaciones entre el tamaño del sedimento, la concentración y el caudal asociado.



6. REFERENCIAS

- Abril, J. F. (2012). *Estudio en modelo físico para el diseño de la obra de disipación de energía en una estructura de compuertas*. Universidad de Cuenca.
- Arboleda Valencia, J. (2000). Teoría de la Coagulación del Agua. *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua* (p. 793). McGraw-Hill.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. Washington DC.
- Beltrán, J., & Ordóñez, D. (2012). *Estudio para establecimiento de tasas de arrastre de fondo para el proyecto de generación hidroeléctrica Hidro San Bartolo mediante modelo físico de lecho móvil*. Universidad de Cuenca.
- Bulle, H. (1926). *Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen*. (VDI, Ed.). Berlin.
- Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos* (Primera., p. 560). McGraw-Hill.
- Dancy, A. (1947). *Stream Sedimentation in a divided channel*. Iowa State College.
- ESHA, E. S. H. A. (2006). *Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica* (p. 174). Programa Energía Inteligente para Europa (IEE).
- Freire Morales, E. G. (2010). *Elaboración e implementación de un software para el diseño de centrales hidroeléctricas hasta 10 MW*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- García Vélez, J. L. (2003). Obras de Captación. *Diseño Hidráulico de Estructuras* (p. 103). Cali.
- Gürbüzdal, F. A. (2009). *Scale effects on the formation of vortices at intake structures*. Middle East Technical University.
- Herreras Espino, J. A. (2004, October). Deterioro de los sistemas de desagüe. *Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil*, 25.
- Hinze, J. O. (1975). *Turbulence* (p. 790). McGraw-Hill. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=DfRQAAAAMAAJ&pgis=1>



- Julien, P. Y. (1998). *Erosion and Sedimentation* (p. 300). Cambridge University Press. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=T14jy4AY10YC&pgis=1>
- Lysne, D., Glover, B., Stole, H., & Tesaker, E. (2003). Hydraulic Design. *Hydropower Development* (Volume 8., p. 190). Norwegian University of Science and Technology.
- Makusa, G., & Kiviniemi, O. (2009). *A Scale Model Investigation of Free Surface Vortex With Particle Tracking Velocimetry*. Luleå University of Technology.
- Mansen Valderrama, A. (2011). *Diseño de Bocatomas*. Perú: UNI-FIC Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología.
- Martín Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos* (p. 329). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Nava Hernández, A., & Cortes Bow, D. (2009). *Hidráulica de Ríos*. Instituto Politécnico Nacional.
- Novak, P., Moffat, A. I. B., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas* (Segunda., p. 593). Colombia: McGraw-Hill.
- Pacheco, E. (PROMAS). (2008). Estudio para identificación de una relación entre Concentración de Sólidos en suspensión y Turbidez en ríos de Montaña: Estudio de caso en la cuenca media del río Paute. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca. Cuenca - Ecuador.
- Pacheco, E. (PROMAS), & Carrillo, V. (PROMAS). (2012a). *Estudio en modelo hidráulico para la optimización del diseño de la obra de captación en el río Negro del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca.* (p. 33). Cuenca - Ecuador.
- Pacheco, E. (PROMAS), & Carrillo, V. (PROMAS). (2012b). *Estudio de sólidos en suspensión relevantes para el proyecto hidroeléctrico Hidrosanbartolo. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca.* (p. 5). Cuenca - Ecuador.
- Rocha Felices, A. (1978). *Introducción Teórica al Estudio de Bocatomas* (p. 37). Lima: Artes Graficas Espino.
- Rocha Felices, A. (1991). Estructuras Hidráulicas. *Transporte de Sedimentos Aplicado al Diseño de Estructuras Hidráulicas* (p. 107). Lima.
- Rocha Felices, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. (U. N. de I. Facultad de Ingeniería, Ed.) (Primera., p. 270). Lima.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Rocha Felices, A. (2005, November). Análisis del comportamiento de los sólidos en una bifurcación. *Bocatomas*, 32.

Schlichting, H., & Gersten, K. (2004). *Boundary-Layer Theory* (p. 801). Springer. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=8YugVtom1y4C&pgis=1>

Soulsby, R. (1997). Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. *ASCE Manual of Practice 110 - Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice*. (p. 1132). London: Thomas Telford.

Taghvaei, S. M., Roshan, R., Safavi, K., & Sarkardeh, H. (2012). Anti-vortex structures at hydropower dams. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(28), 5069–5077. doi:10.5897/IJPS12.387



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXOS



Anexo A1 – Planos de Diseño de la Bocatoma

A continuación se presentan los planos de diseño de la obra de captación en el río Negro del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo. Cortesía de HIDROSANBARTOLO S.A.



Anexo A2 – Planos de Rediseño de la Bocatoma

A continuación se presentan los planos de diseño de la obra de captación en el río Negro del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo. Cortesía de HIDROSANBARTOLO S.A.

Anexo A3 – Expresiones para determinar la profundidad de sumergencia en captaciones profundas

Hay diversidad de formulas empíricas para definir la inmersión mínima necesaria para que no se formen vórtices importantes, pero no existe teoría alguna que explique a fondo el problema y tome en cuenta todos los parámetros que lo hacen posible. El grado mínimo de inmersión viene definido en la figura.

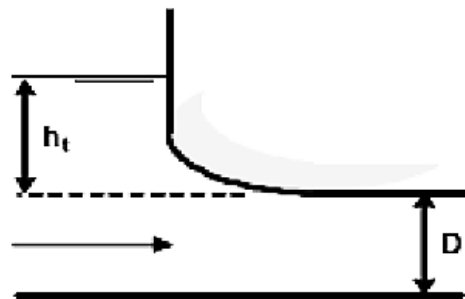


Figura A4.1. Altura mínima de inmersión

La inmersión viene definida por h_t . Las formulas siguientes expresan su valor mínimo para evitar la vorticidad (ESHA, 2006).

Referencia	Formulación	Observaciones
Knauss	$h_t \geq D * \left(1 + 2.3 * \frac{V}{\sqrt{gD}} \right)$	
Nagarkar	$h_t \geq 4.4 * (V * D^{0.50})^{0.54}$	
Rohan	$h_t \geq 1.474 * V^{0.48} * D^{0.76}$	
Gordon	$h_t \geq c * V * \sqrt{D}$	c = 0.7245 para geometría asimétrica c = 0.5434 para geometría simétrica

En las que V es la velocidad media de la corriente en m/s, y D el diámetro hidráulico en m de la tubería.



UNIVERSIDAD DE CUENCA