

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

### PROTECCIONES NATURALES CONTRA LA SOCAVACIÓN EN RÍOS: ESTUDIO DE CASO DEL RÍO TOMBAMBA.

**Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Civil.**

**Autores:**

David Marcelo Aguirre Granda.  
C.I. 0104436837  
Raúl Andrés Berrezueta Tapia.  
C.I. 0104297486

**Director:**

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar.  
C.I.0102114550

**Tutor:**

Ing. José Vicente Tinoco Ochoa.  
C.I.0104228051

**Octubre-2016**



## Resumen

Los fenómenos hidrológicos en ríos causan alteraciones en la geomorfología de los mismos, tales como alteración de la pendiente del fondo, cambio del ancho e incremento de las velocidades del flujo. Este último acelera los procesos de socavación en las riberas del cauce. Comúnmente se protege las orillas contra procesos de socavación con muros de protección de roca o concreto, sin embargo, esta solución trae consigo efectos adversos en las funciones hidrodinámicas del río. Es por ello que el presente estudio plantea técnicas naturales para el diseño de obras de protección de orillas de cuerpos fluviales, con el objetivo de evitar el avance de procesos de socavación. El estudio comprende un tramo de un kilómetro del río Tomebamba, ubicado en la ciudad de Cuenca, propenso al deterioro de las orillas por socavación, y donde las soluciones ejecutadas no son adecuadas. El diseño de las protecciones se ha basado en la siguiente información: topografía del cauce y de zonas de inundación, información hidrológica histórica, detalle de uso del suelo, y granulometría del cauce. Se ha cuantificado la socavación a partir de los calados y velocidades del flujo, resultantes del modelamiento bidimensional hidrodinámico del río, formulado a partir de las ecuaciones de Saint Venant. Finalmente, se propone tres alternativas de diseño basadas en técnicas de bioingeniería; muro krainer y empalizadas y biotecnología; gaviones vegetalizados.

**Palabras clave:** hidrología, ríos, socavación.



## Abstract

Hydrological processes in rivers cause alternations in their geomorphology, such as alteration of the bed slope, change the width and variation in velocities. Increases in velocities accelerate bank erosion. It is a common practice, protect the banks against scour processes with protective walls of rock or cement, but this solution brings adverse effects on the river's hydrodynamic processes. That is why this study propose natural techniques for design structures of rivers bank protection, in order to avoid scour progress processes. The study comprises a one-kilometer section from the Tomebamba River, located in Cuenca-Ecuador, which is vulnerable to degradation by the bank's scour, and where the executed solutions are not suitable. In the order to design protection banks the following information was collected: channel and floodplain topography, historical hydrological information, detail land use, and particle size of the channel. Scour be quantified from depth and flow velocities, resulting from two-dimensional hydrodynamic modeling of the river from Saint Venant equations. Finally, three design alternatives based on bioengineering and biotechnology techniques are proposed.

**Keywords:** hydrology, rivers, scour.



# Índice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                 | <b>11</b> |
| 1.1      | JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE .....                             | 11        |
| 1.2      | OBJETIVOS.....  | 11        |
| 1.2.1    | <i>Objetivo general.....</i>                              | <i>11</i> |
| 1.2.2    | <i>Objetivos específicos.....</i>                         | <i>12</i> |
| <b>2</b> | <b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                         | <b>13</b> |
| 2.1      | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....                            | 13        |
| 2.1.1    | <i>Ubicación .....</i>                                    | <i>13</i> |
| 2.1.2    | <i>Topografía.....</i>                                    | <i>13</i> |
| 2.1.3    | <i>Morfología .....</i>                                   | <i>14</i> |
| 2.1.4    | <i>Hidrología.....</i>                                    | <i>14</i> |
| 2.1.5    | <i>Uso de suelo .....</i>                                 | <i>15</i> |
| 2.1.6    | <i>Caracterización del material del río .....</i>         | <i>15</i> |
| 2.1.7    | <i>Caracterización general del tramo de estudio .....</i> | <i>17</i> |
| 2.2      | CONSIDERACIONES TEÓRICAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO .....    | 19        |
| 2.2.1    | <i>Socavación general.....</i>                            | <i>20</i> |
| 2.2.2    | <i>Bases teóricas para diseño de protecciones .....</i>   | <i>20</i> |
| 2.3      | MODELOS BIDIMENSIONALES PARA EL ESTUDIO.....              | 25        |
| 2.3.1    | <i>Implementación del modelo bidimensional.....</i>       | <i>27</i> |
| 2.3.2    | <i>Validación del modelo .....</i>                        | <i>29</i> |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                       | <b>30</b> |
| 3.1      | IBER.....   | 30        |
| 3.1.1    | <i>Calibración del modelo .....</i>                       | <i>30</i> |
| 3.1.2    | <i>Resultados del modelo.....</i>                         | <i>31</i> |
| 3.2      | ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN PROPUESTAS .....                | 33        |
| 3.2.1    | <i>Enrocado .....</i>                                     | <i>36</i> |
| 3.2.2    | <i>Estabilidad de muros .....</i>                         | <i>38</i> |
| 3.2.3    | <i>Filtro.....</i>  | <i>42</i> |
| 3.3      | ESTRUCTURAS.....  | 43        |
| 3.3.1    | <i>Sección en 0+260.....</i>                              | <i>43</i> |
| 3.3.2    | <i>Sección en 0+315.....</i>                              | <i>45</i> |
| 3.3.3    | <i>Sección en 0+680.....</i>                              | <i>46</i> |
| 3.3.4    | <i>Sección en 0+780.....</i>                              | <i>47</i> |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                | <b>49</b> |
| <b>5</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                 | <b>51</b> |
| <b>6</b> | <b>ANEXOS .....</b>                                       | <b>52</b> |



## Cláusula de derechos de autor



Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

---

Yo David Marcelo Aguirre Granda, autor de la tesis "PROTECCIONES NATURALES CONTRA LA SOCAVACION EN RIOS: ESTUDIO DE CASO DEL RÍO TOMBAMBAMBA", 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 hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, octubre de 2016

David Aguirre  
David Marcelo Aguirre Granda

C.I. 0104436837



## Cláusula de derechos de autor

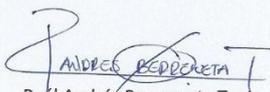


Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

---

Yo Raúl Andrés Berrezueta Tapia, autor de la tesis "PROTECCIONES NATURALES CONTRA LA SOCACACION EN RIOS: ESTUDIO DE CASO DEL RÍO TOMBAMBA.", 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.

Cuenca, octubre de 2016

  
Raúl Andrés Berrezueta Tapia

C.I. 0104297486



## Cláusula de propiedad intelectual



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

---

Yo David Marcelo Aguirre Granda, autor de la tesis "PROTECCIONES NATURALES CONTRA LA SOCAVACION EN RÍOS: ESTUDIO DE CASO DEL RÍO TOMBAMBA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre del 2016

David Aguirre  
David Marcelo Aguirre Granda

C.I: 0104436837



## Cláusula de propiedad intelectual

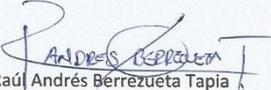


Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

---

Yo Raúl Andrés Berrezueta Tapia, autor de la tesis "PROTECCIONES NATURALES CONTRA LA SOCAVACION EN RÍOS: ESTUDIO DE CASO DEL RÍO TOMEBAMBA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre del 2016

  
Raúl Andrés Berrezueta Tapia

C.I: 0104297486



## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este trayecto universitario, especialmente a mis padres Oswaldo y Ruth, a mis hermanas Gabriela y Patricia y a mi hermano Wilson el cuál ahora forma parte de todo.

### **David**

A mis padres Ivan y Priscila, por su sacrificio, consejos y por guiarme durante todo el transcurso de mi carrera. A mis hermanos Santiago y Erick y a mi hermana Camila, por estar presentes durante este proceso. A mi novia Cristina por su apoyo en cada momento que ha marcado mi vida.

A cada uno de los miembros de mi familia, quienes mostraron interés y preocupación durante el transcurso de mi carrera.

### **Andres**



## **Agradecimientos**

Agradecemos a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo, especialmente al Ing. Esteban Pacheco y al Ing. Vicente Tinoco que han servido de guía para su ejecución.

Además queremos agradecer también al Sr. Bruno Aguirre encargado del Laboratorio de Hidráulica, por la colaboración prestada durante la realización del trabajo.



# 1 Introducción

## 1.1 Justificación y Alcance

El deterioro del cuerpo fluvial de un río es causado por varios factores importantes, uno de ellos se refiere a alteraciones morfológicas que provocan cambios en el espacio fluvial y variaciones en la velocidad de flujo trayendo consigo fenómenos asociados como pérdida de estabilidad de las riberas, incidencia de procesos de inundación, socavación, entre otros.

Es una práctica común, proteger las orillas con muros de roca u obras de concreto. Sin embargo, existen problemas asociados a esta solución, que están relacionados con: i) deficiente regulación de caudales, ii) ruptura de la interacción ecológica entre el cauce principal y las riberas, e iii) impacto paisajístico que producen estos materiales ajenos a los naturales.

El estudio analiza un tramo de un kilómetro del río Tomebamba, ubicado en la ciudad de Cuenca, cauce que siendo propenso al deterioro de las orillas por socavación ha sido sujeto de varias intervenciones, que no necesariamente son las más adecuadas, proponiéndose por ello la implementación de estructuras naturales de protección dimensionadas mediante solución numérica, basadas en técnicas de bioingeniería (realizadas con materiales bióticos únicamente) y técnicas de biotecnología (combinación de materiales bióticos e inertes), ambas proyectadas para que cumplan exigencias medioambientales y para actuar eficazmente frente a fenómenos erosivos.

La obtención de velocidades y calados necesarios para el cálculo de la socavación en las riberas y el cauce, son obtenidos mediante modelación bidimensional de flujo. El diseño de las estructuras es realizado en base a los resultados de cálculo de socavación.

Mediante el trabajo propuesto, se espera dar un importante aporte al entendimiento, aplicación y desarrollo de propuestas ingenieriles para la optimización del diseño de obras para control y manejo de cauces. Los resultados del estudio se constituyen en un elemento para el desarrollo futuro de documentos de divulgación técnica/científica que se ejecutan a través del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos y el Grupo de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Aportar a los procedimientos de diseño de protecciones naturales contra la socavación en ríos de montaña mediante la aplicación de técnicas de bioingeniería y biotecnología en un tramo del río Tomebamba.



### 1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar el comportamiento hidráulico y fluviomorfológico en el tramo del río en estudio, con soporte en la información hidrológica y en el modelamiento del flujo a través del cauce y las orillas.
- Determinar un método para el cálculo de erosión en riberas de ríos que se adapte a las condiciones morfológicas del río.
- Proponer técnicas de protección para el cauce y las riberas de ríos, acordes al ámbito geográfico y tomando en cuenta su relación con el medio ambiente.

## 2 Materiales y Métodos

### 2.1 Descripción del proyecto

#### 2.1.1 Ubicación

El proyecto está ubicado en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay y comprende un tramo de un kilómetro del río Tomebamba que se encuentra entre el puente de la Av. Unidad Nacional y el puente peatonal del Otorongo, con una elevación promedio de 2550 m.s.n.m.

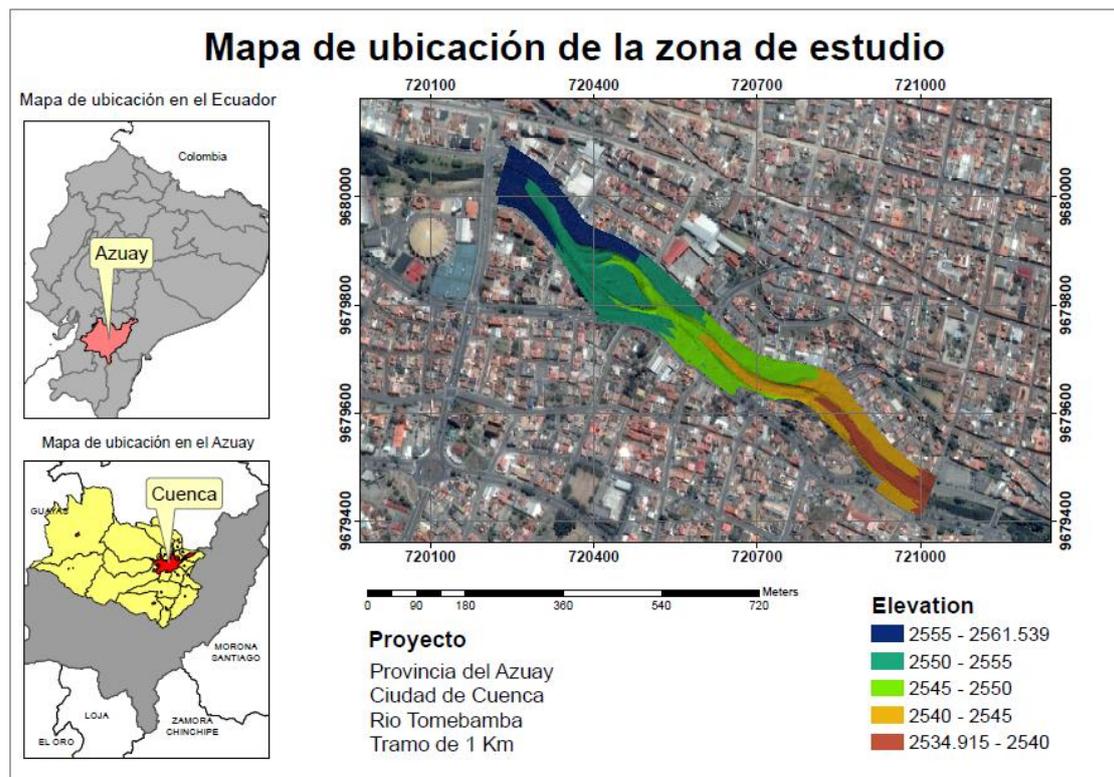


Figura 1. Ubicación del proyecto

#### 2.1.2 Topografía

La topografía del área de estudio fue obtenida en campo mediante secciones transversales al flujo, realizadas con estación total, las cuales fueron tomadas a distancias de: 20 m. en tramos rectos y 10 m. en tramos curvos, se levantó además información sobre las estructuras existentes a lo largo del tramo. El anexo 1 muestra la topografía de la zona.

Posteriormente esta información fue procesada para obtener un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con un ancho de celda de 20 cm., el cual es necesario para el modelamiento hidráulico.

### 2.1.3 Morfología

La morfología fluvial es el estudio de la forma y estructura de los ríos, incluyendo los cambios que experimentan en su perfil longitudinal, sección transversal y fondo; estos cambios dependen de las características topográficas y geotécnicas del río o de acciones externas como las intervenciones humanas. (Suárez 2001)

El trayecto del río Tomebamba se encuentra en una cuenca de montaña, la cual recibe el mismo nombre del río. Según la clasificación tradicional el tramo sujeto a estudio se lo puede definir como trazado recto con un coeficiente de sinuosidad menor a 1.5 en el que no se aprecian curvas.

En cuanto a la pendiente del cauce, ha sido calculada en base a un promedio de las pendientes de cada sección a lo largo del tramo, obteniendo una pendiente promedio de 0.024.

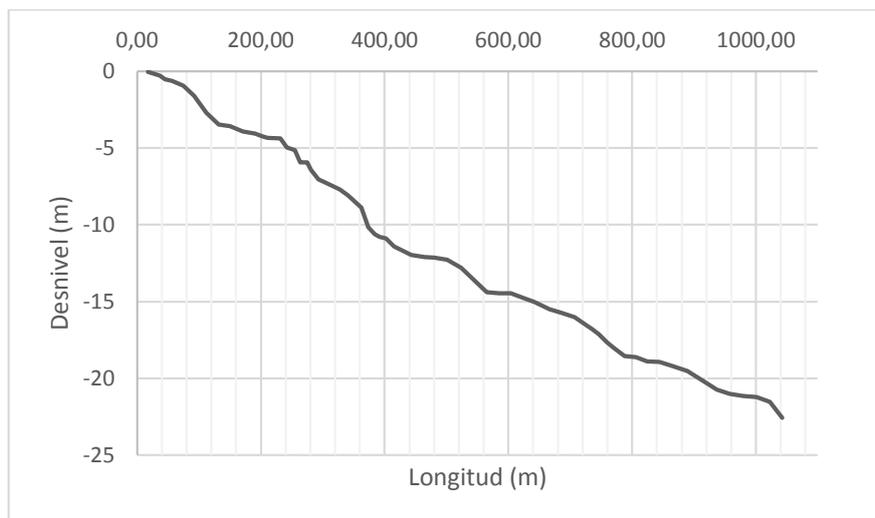


Figura 2. Perfil longitudinal del río

### 2.1.4 Hidrología

La información hidrológica de caudales fue obtenida de un estudio realizado por la institución amra (analysis and monitoring of enviromental risk) a partir de una estación hidrológica ubicada en el Parque el Paraíso (levantamiento topográfico 4T), en el anexo 2 se muestra un resumen del estudio.

La información proporcionada por el estudio posee caudales proyectados para periodos de retorno de 10, 30 y 50 años, como se muestra en la tabla 1.

| Periodo de retorno (años) | Caudal (mc/s) |
|---------------------------|---------------|
| 10                        | 139.73        |
| 30                        | 192.64        |
| 50                        | 219.37        |

Tabla 1. Caudales proyectados (Fuente: amra)

### 2.1.5 Uso de suelo

Se realizó mediante inspección visual, en el cual podemos distinguir básicamente tres usos: río, áreas verdes, y vías.

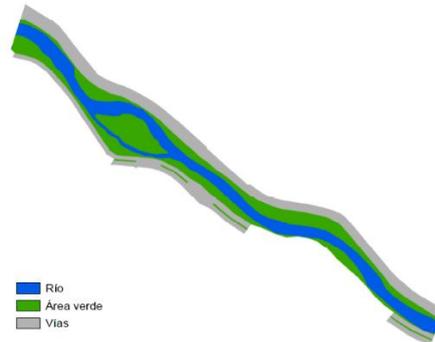


Figura 3. Mapa de usos de suelo

### 2.1.6 Caracterización del material del río

La caracterización de los materiales que componen el río se ha dividido en: materiales de la ribera que serán descritos mediante una clasificación de suelos y materiales del cauce que serán representados mediante una curva granulométrica.

#### Clasificación de suelo

Es necesario la clasificación de suelo para la obtención de parámetros geotécnicos que se usarán en el diseño de las protecciones. La muestra para la clasificación se tomó de la isla, con esta se procedió a realizar los ensayos pertinentes y se clasificó mediante el método SUCS. La muestra tiene un peso de 348 g.

| #     | Tamiz         | Peso que retiene (gr) | Peso acumulado (gr) | % Retenido acumulado | % que pasa |
|-------|---------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------|
|       | Abertura (mm) |                       |                     |                      |            |
| 10    | 2             | 43.25                 | 43.25               | 12.43                | 87.57      |
| 30    | 0.595         | 73.3                  | 116.55              | 33.49                | 66.51      |
| 40    | 0.425         | 67.25                 | 183.8               | 52.82                | 47.18      |
| 50    | 0.297         | 60                    | 243.8               | 70.06                | 29.94      |
| 100   | 0.15          | 71.3                  | 315.1               | 90.55                | 9.45       |
| 200   | 0.075         | 21.05                 | 336.15              | 96.59                | 3.41       |
| Fondo | 0.02          | 11.85                 | 348                 | 100.00               | 0.00       |

Tabla 2. Granulometría del suelo

|            | P. Húmedo (gr) | P. Seco (gr) | % Humedad | % Humedad promedio |
|------------|----------------|--------------|-----------|--------------------|
| Muestra #1 | 19.84          | 16.1         | 23.23     | 23.44              |
| Muestra #2 | 16.94          | 13.7         | 23.65     |                    |

Tabla 3. Límite plástico del suelo

| # golpes | P. Húmedo (gr) | P. Seco (gr) | % Humedad | % Promedio |
|----------|----------------|--------------|-----------|------------|
| 15       | 21             | 15.7         | 33.76     | 33.55      |
|          | 22             | 16.5         | 33.33     |            |
| 24       | 22             | 17.4         | 26.44     | 26.51      |
|          | 15             | 11.85        | 26.58     |            |

|                            |    |      |       |              |
|----------------------------|----|------|-------|--------------|
| 27                         | 29 | 23.1 | 25.54 | 25.61        |
|                            | 23 | 18.3 | 25.68 |              |
| 38                         | 20 | 16.6 | 20.48 | 20.10        |
|                            | 17 | 14.2 | 19.72 |              |
| <b>Límite líquido (LL)</b> |    |      |       | <b>26.21</b> |

Tabla 4. Límite líquido del suelo

Según los resultados obtenidos en las tablas anteriores, y siguiendo el procedimiento del método SUCS se determinó que al suelo corresponde a una arena-limosa (SM).

Una vez determinado el tipo de suelo, es necesario cuantificar el coeficiente de cohesión y el ángulo de fricción interna, para lo cual se utilizará la tabla 5, obtenida de (Peck, Hanson, y Thornburn 1974)

| Grupo | Ensayo Proctor estándar              |                  | Porosidad<br>n | Resistencia al corte<br>(tensiones efectivas)     |           | Compactación Proctor<br>Modificado |  |
|-------|--------------------------------------|------------------|----------------|---|-----------|------------------------------------|--|
|       | d <sub>max</sub><br>t/m <sup>3</sup> | W <sub>opt</sub> |                | C' kg/cm <sup>2</sup><br>después de<br>saturación | tan φ'    | CBR                                | Módulo de<br>reacción kg/<br>cm <sup>3</sup> |
| GC    | >1.84                                | <14.7            | <31            | 0.05  | >0.60     | 20-40                              | 5-8  |
| SW    | 1.83-1.99                            | 10.8-15.8        | 30-24          | -   | 0.77-0.81 | 15-25                              | 5-8  |
| SP    | 1.73-1.82                            | 10.0-13.0        | 34.5-31        | -   | 0.72-0.76 | 20-45                              | 5-8  |
| SM    | 1.81-1.85                            | 14.1-14.9        | 32.7-31.2      | 0.13-0.27   | 0.65-0.69 |                                    | 5-8  |
| SC    | 1.85-1.91                            | 12.3-14.0        | 31.3-29        | 0.09-0.21   | 0.59-0.73 | +                                  | +  |
| ML    | 1.63-1.75                            | 16-19.9          | 39.4-35        | 0.09  | 0.58-0.66 | 5-15                               | 3-5  |
| CL    | 1.65-1.75                            | 17-19.5          | 38.8-35.2      | 0.1-0.15  | 0.50-0.58 | 5-15                               | 3-5  |
| MH    | 1.25-1.38                            | 33.1-39.5        | 50.7-55.9      | 0.11-0.29   | 0.42-0.52 | +                                  | +  |

Tabla 5. Valores de propiedades mecánicas

### Granulometría del cauce

Es necesario realizar una granulometría del cauce para obtener el diámetro característico  $d_{50}$ , necesario para el cálculo de la socavación.

La muestra fue tomada de 1 m<sup>2</sup> del cauce, siguiendo el procedimiento descrito por (Díaz 2010). A continuación, se muestra el procesamiento de datos y la curva granulométrica obtenida.

| Pulg - N° | Tamiz         | Peso retenido<br>(g) | % Retiene | % Acumulado | % Pasa |
|-----------|---------------|----------------------|-----------|-------------|--------|
|           | Abertura (mm) |                      |           |             |        |
| 3         | 76.2          | 0                    | 0.00      | 0.00        | 100.00 |
| 2 ½       | 63.5          | 1313                 | 18.04     | 18.04       | 81.96  |
| 2         | 50.8          | 1440                 | 19.79     | 37.83       | 62.17  |
| 1 ½       | 38.1          | 1878                 | 25.81     | 63.64       | 36.36  |
| 1         | 25.4          | 841                  | 11.56     | 75.20       | 24.80  |
| ¾         | 19.05         | 554                  | 7.61      | 82.81       | 17.19  |
| ½         | 12.7          | 357                  | 4.91      | 87.71       | 12.29  |
| 3/8       | 9.52          | 194                  | 2.67      | 90.38       | 9.62   |
| 4         | 4.76          | 331                  | 4.55      | 94.93       | 5.07   |
| 8         | 2.38          | 175                  | 2.40      | 97.33       | 2.67   |

|              |       |             |      |        |      |
|--------------|-------|-------------|------|--------|------|
| 16           | 1.19  | 73          | 1.00 | 98.34  | 1.66 |
| 30           | 0.595 | 53          | 0.73 | 99.07  | 0.93 |
| 50           | 0.297 | 45          | 0.62 | 99.68  | 0.32 |
| 100          | 0.149 | 19          | 0.26 | 99.95  | 0.05 |
| 200          | 0.074 | 0           | 0.00 | 99.95  | 0.05 |
| Fondo        |       | 4           | 0.05 | 100.00 | 0.00 |
| <b>Total</b> |       | <b>7277</b> | -    | -      | -    |

Tabla 6. Granulometría del cauce

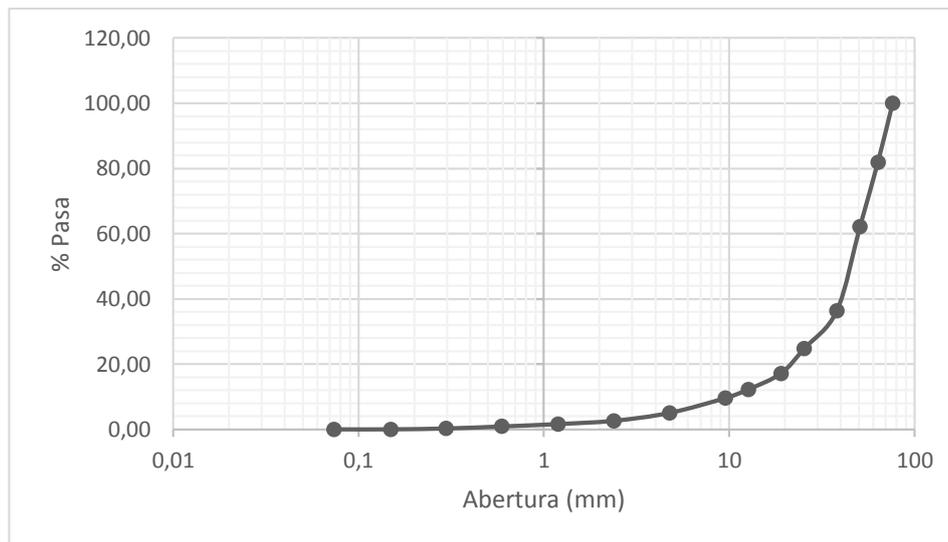


Figura 4. Curva granulométrica del cauce

El diámetro característico calculado es  $d_{50} = 4.5 \text{ cm}$ .

### 2.1.7 Caracterización general del tramo de estudio

Para la caracterización del tramo de estudio se ha optado por dividir a la zona en tramos, los cuales se describen centrándose en los problemas hidráulicos que presentan las márgenes y el cauce.



Figura 5. Esquematización de los tramos de estudio



### **Tramo 1**

El primer tramo está localizado desde la abscisa 0+000 hasta la abscisa 0+230.

En la ribera ubicada en la Av. 3 de Noviembre se localiza un muro de hormigón que va desde la abscisa 0+000, tiene una longitud de 130 m. y una altura promedio de 3.5 m., el muro se encuentra en buen estado y no presenta signos de socavación local, aguas abajo del muro se localiza una margen sin protección, la misma que se encuentra cubierta de vegetación y arboles pequeños distribuidos a lo largo de ella.

La ribera ubicada en la calle Imbabura se encuentra casi en su totalidad cubierta de césped, además de algunos árboles repartidos a lo largo de la margen. En esta orilla está ubicado también un enrocado que inicia en la abscisa 0+165 y tiene una longitud de 49 m., en el que no se observa ningún tipo de vegetación y su estructura no presenta signos de deterioro, ni de socavación.

### **Tramo 2**

Este tramo se halla entre abscisas 0+230 y 0+290.

La ribera perteneciente a la isla, forma la parte cóncava de una curva y presenta un enrocado con una longitud aproximada de 24 m., se puede observar el mal estado del muro ya que existen signos claros de socavación y rocas desintegradas, las mismas que han caído hacia el cauce del río. En la parte convexa de la curva que pertenece a la ribera ubicada en la Av. 3 de Noviembre, existe un talud bastante pronunciado que no presenta ningún tipo de estructura y de igual manera se encuentra cubierto de césped.

### **Tramo 3**

Este tramo queda entre las abscisas 0+290 y 0+420.

En la ribera perteneciente a la Av. 3 de Noviembre, existe un talud de pendiente pronunciada en la que se encuentra un enrocado que inicia en la abscisa 0+290, tiene 70 m. de longitud y aproximadamente 3 m. de altura, parte de este enrocado está en mal estado, ya que en la abscisa 0+305 se puede observar que alrededor de 9 m. de este se encuentra destruido casi en su totalidad, mientras que, en la abscisa 0+325 existe un colapso de aproximadamente 13 m. Las partes del enrocado bien conservadas están cubiertas de césped y plantas arbustivas. Cabe también indicar que existe un tramo en el cual se presenta socavación local, esto a causa de la colocación del enrocado.

En la abscisa 0+370 se evidencia la formación de un pozo creado a partir de la socavación producida por la recirculación de flujo que se origina en el cauce debido a la salida de agua de una alcantarilla ubicada en la ribera de la Av. 3 de Noviembre. Las riberas pertenecientes a la isla se encuentran en mal esta debido al problema mencionado anteriormente.

### **Tramo 4**

Este tramo pertenece a la bifurcación del cauce que se produce en la abscisa 0+230 y está constituido por una curva, cuya parte cóncava se encuentra ubicada en la Av. 12 de Abril e Imbabura; las riberas que conforman la sección se encuentran cubiertas de césped y de árboles de eucalipto de gran tamaño. Al finalizar el tramo se observa un muro de hormigón de 33 m. de longitud que básicamente fue construido para sostener la



calzada de la Av. 12 de Abril, el cual se encuentra en buen estado y no presenta signos de socavación local.

### Tramo 5

Está comprendido entre la abscisa 0+420 y 0+720.

Las riberas a lo largo de toda la sección se encuentran cubiertas de césped y arboles pequeños, casi en su totalidad se encuentran en buen estado, sin embargo, en la abscisa 0+490 se presenta un deslizamiento del talud debido a su pendiente pronunciada.

En la abscisa 0+660 el cauce forma una curva derecha, sus riberas están completamente cubiertas de césped, no se presentan estructuras realizadas, sin embargo, su estudio es importante ya que se define como una zona de erosión.

### Tramo 6

Comprendido entre la abscisa 0+720 y 1+040, sus riberas están cubiertas completamente de césped y no presentan estructuras salvo las nombradas a continuación.

En el tramo se presenta en una curva izquierda desde la abscisa 0+720 hasta 0+820, su estudio es importante debido a que se encuentra en una zona de erosión al igual que la sección anterior.

Aguas abajo de la curva, en la abscisa 0+960, en la ribera perteneciente a la Av. 12 de Abril está construido un muro de mampostería realizado para sostener la calzada de la misma.

## 2.2 Consideraciones teóricas empleadas en el estudio

La erosión fluvial es el desprendimiento y transporte de partículas que constituyen un río por la acción del flujo, por lo tanto, la magnitud y tipo de erosión se encontrará en función de las características geotécnicas de los materiales de fondo y taludes. (Suárez 2001)

En las márgenes la erosión produce una inestabilidad que dependerá de los parámetros de resistencia “ $c$  y  $\phi$ ” del talud. (Maza Alvarez y García Flores 1996)(Suárez 2001)

La acción del agua sobre el fondo del cauce produce esfuerzos cortantes que tienden a desestabilizar las márgenes, provocando deslizamientos en sentido del flujo (García Vega et al. 2014). Este esfuerzo cortante se denomina tensión tractiva y está representada por la siguiente ecuación:

$$\tau = \gamma_h * R_h * I * c \quad (1)$$

donde:

$\tau$  = Tensión tractiva ( $KN/m^2$ )

$\gamma_h$  = Peso específico del agua ( $KN/m^3$ )

$R_h$  = Radio hidráulico ( $m$ )

$I$  = Pendiente ( $m$ )

$c$  = Coeficiente de corrección



El coeficiente de corrección se determina de la tabla 7, donde  $b/y$  es la relación existente entre el ancho y el calado del río.

| <b>b/y</b>   | <b>2</b> | <b>4</b> | <b>8</b> |
|--------------|----------|----------|----------|
| <b>Fondo</b> | 0.89     | 0.97     | 0.99     |
| <b>Talud</b> | 0.74     | 0.75     | 0.76     |

Tabla 7. Valores del coeficiente de corrección  $c$

La velocidad requerida para erosionar un canal bien constituido es más grande que la velocidad necesaria para mantener las partículas en movimiento, y la presencia de material en suspensión en el agua aumenta la resistencia de las fuerzas erosivas, permitiendo al canal soportar altas velocidades antes de que presente efectos de socavación apreciables. (Vide y Upc 2007). Para el estudio se ha considerado el diagrama de Hjulstrom (1935)

### 2.2.1 Socavación general

Para la determinación de la socavación se utiliza las ecuaciones de Lacey y Blench que son formulaciones completamente empíricas basadas en estudios de ríos de grava gruesa. (Ayala et al. 2010)

#### Lacey

$$h_s = 1.34 \left( \frac{q^2}{1.76 \cdot d_{50}^{0.5}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

#### Blench

$$h_s = 0.38 \cdot \frac{q^{0.667}}{d_{50}^{0.167}} \quad (3)$$

donde:

$h_s$  = Profundidad de socavación ( $m$ )

$d_{50}$  = Diámetro característico, permite el paso del 50% del material ( $mm$ )

$q$  = Caudal de diseño por unidad de ancho ( $m^3/s.m$ )

### 2.2.2 Bases teóricas para diseño de protecciones

#### Bases de cálculo para enrocado

El diseño del enrocado se ha realizado mediante el método de Pilarczyk (1990), este es un método empírico que determina el tamaño de rocas que conforman el enrocado, relaciona el tamaño de piedra con la velocidad de flujo circundante por el canal, y sus coeficientes fueron derivados de pruebas realizadas con prototipos (González Ortega 2004), su ecuación se presenta a continuación:

$$D_{50} = \frac{0.035\phi}{\Delta\psi_{Cr}} K_T K_h K_S^{-1} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

donde:



- $D_{50}$ : Tamaño característico de la piedra
- $\Phi$ : Factor de corrección de estabilidad (Tabla 8)
- $\Delta$ : Densidad relativa del revestimiento (Tabla 8)
- $\Psi_{Cr}$ : Factor de estabilidad (Tabla 8)
- V: es la velocidad media
- $g$ : Aceleración de la gravedad
- $y$ : Profundidad del agua.

| Parámetro   | Riprap    | Gaviones: Cajas y colchones | Bloques con cables y mantas asfálticas | Observaciones               |
|-------------|-----------|-----------------------------|--|-----------------------------|
| D           | $D_{50}$  | $D_{50}$                    | Espesor                                |                             |
| $\Phi$      | 0.75      | 0.75                        | 0.5                                    | Protección continua         |
|             | 1.0 - 1.5 | 1.0 - 1.5                   | 1                                      | En bordes y transiciones    |
| $\Delta$    | s-1       | (1-n) (s-1)                 | (1-n) (s-1)                            | n = 0.4 para piedra y arena |
| $\Psi_{Cr}$ | 0.035     | 0.07                        | 0.07                                   | -                           |

Tabla 8. Valores de los coeficientes de Pilarczyk

$K_T$ : Factor de turbulencia ( $K_T=1.0$  para turbulencia normal de río,  $K_T=1.5 - 2.0$  para turbulencia alta, aguas abajo de estructuras, curvas exteriores agudas, disturbios locales)

$K_h$ : Factor de profundidad

$$K_h = \left(\frac{D_{50}}{y}\right)^{0.2} \tag{5}$$

$K_s$ : Factor de pendiente, definido como el producto de un término de pendiente del banco ( $K_d$ ) y pendiente longitudinal  $K_1$ , para protección de lecho  $K_s= 1$

$$K_s = K_d * K_1 \tag{6}$$

$$K_d = \cos \alpha \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right)^2\right]} \tag{7}$$

$$K_1 = \frac{\sin(\phi-\beta)}{\sin \phi} \tag{8}$$

- $\alpha$ : Pendiente del banco
- $\phi$ : Ángulo de fricción interna
- $\beta$ : Pendiente longitudinal del cauce

**Técnicas de bioingeniería y biotecnología**

Para el estudio se ha considerado técnicas de bioingeniería, las cuales utilizan únicamente vegetación para la protección de riberas, es el método más natural ya que es fácil de establecer y mantener, son efectivas en rangos de velocidades menores a 4.5 m/s.

Cuando se presentan secciones en el cuerpo fluvial que tienen velocidades bastante altas (mayores a 4.5 m/s) y por ende tasas de erosión elevadas, el utilizar únicamente vegetación como protecciones no es la solución más adecuada, por lo tanto, es necesario la combinación de materiales inertes con vegetación, al uso de estas técnicas se las conoce como biotecnología.

### **Muro krainer**

El muro krainer es una técnica de bioingeniería, compuesta por troncos dispuestos en sucesivos planos horizontales entre los cuales se siembra vegetación. Usada para frenar procesos erosivos que ocurren en las riberas de los ríos.

En el diseño de esta estructura se deberían tener en cuenta una gran cantidad de variables de muy distinta tipología, como mecánica de suelos e hidráulica. (Hernanz, M. et. al. 2007)



*Figura 6. Muro krainer construido y revegetado.  
(Fuente: Tragsa 2011)*

### **Empalizadas de troncos**

Las empalizadas son obras realizadas mediante el clavado vertical de troncos unidos entre sí con troncos horizontales para formar una estructura firme. Adicionalmente se siembra vegetación en la parte alta de la empalizada con el objetivo de brindar protección a la estructura cuando ocurran fenómenos hidrológicos de magnitud considerable. (Lagasse et al. 2009)



Figura 7. Empalizada construida. (Fuente: Tragsa, 2007)

### Gaviones vegetalizados

Lo gaviones son cajas rectangulares de malla de alambre rellenas o cantos o bloques de roca, utilizados normalmente para estabilización de taludes, en el caso de protecciones para márgenes de ríos es una de las técnicas convencionales, sin embargo, puede convertirse en una técnica de biotecnología mediante la vegetalización que consiste en la siembra de estacas vivas entre niveles del muro que se enraízan en el suelo detrás del muro y proporcionan estabilidad y defensa contra la erosión. (Suárez 2001)

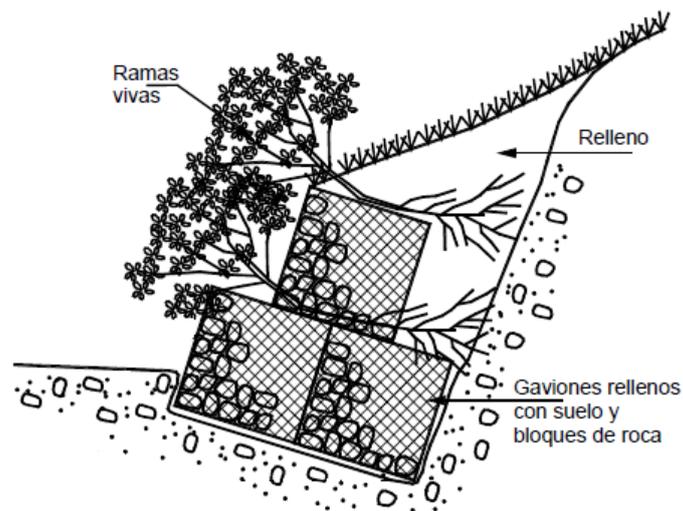


Figura 8. Muro de gaviones vegetalizados (Fuente: Suarez, 2009)

### Bases de cálculo

Estabilidad del muro

Para comprobar la estabilidad de cada uno de los muros frente a deslizamientos longitudinales, se utilizará la fórmula descrita a continuación:

$$C_{dl} = \frac{\mu * R_y + c' * B}{R} \quad (9)$$



donde:

$R_y$  = Resultante de las fuerzas verticales ( $kN/m$ )

$\mu$  = Coeficiente de fricción suelo-muro ( $\mu = \tan\delta$ ) ( $rad$ ), donde  $\delta = \frac{2}{3}\phi$ .

$\phi$  = Angulo de fricción interna del suelo

$c'$  = Coeficiente de cohesión corregido (0.5-0.7 veces la cohesión del suelo de fundación) ( $kN/m^2$ )

$B$  = Anchura equivalente del muro ( $m$ )

$R$  = Resultante de las fuerzas longitudinales ( $kN/m$ )

Para que los muros cumplan con los requisitos de estabilidad frente a deslizamientos longitudinales debe verificar que el coeficiente calculado sea mayor o igual a 1.5. (García Vega et al. 2014)

Filtro

El objetivo del filtro en cada uno de los muros es disminuir la presión de poros que ocasionan empujes que pueden desestabilizar la estructura. El diseño de filtros se realizará en base a criterios relacionados con la granulometría del material filtrante, y especificados a continuación:

$\frac{D_{15f}}{D_{85s}}$ , mayor a 4 y menor que 9, material filtro

$\frac{D_{15f}}{D_{15s}}$ , menor a 40, condición 1

$\frac{D_{50f}}{D_{50s}}$ , menor a 25, condición 2

$\frac{D_{15f}}{D_{15s}}$ , mayor a 4, criterio de permeabilidad

$\frac{D_{60f}}{D_{10f}}$ , menor que 20 y tamaño de partícula no mayor a 75 mm, coeficiente de uniformidad

Geotextil

El geotextil es una tela permeable filtrante que permite que el agua fluya desde el suelo hasta el filtro sin problema, será colocado en cada uno de los muros y será diseñado con la siguiente ecuación:

$$0_{95} < B * D_{85s}$$

donde:

$$B = 1 \quad 2 \text{ ó } > 8$$

$$B = 0.5 C_u \quad 2 < C_u < 4$$

$$B = 8 / C_u \quad 4 < C_u < 8$$

donde:

$0_{95}$  = Tamaño de la abertura medida del geotextil a la cual el 95% del peso de partículas esféricas de vidrio es retenido.

$D_{85s}$  = Diámetro de tamiz en mm. que permite el paso del 85% en peso del suelo.

$C_u = D_{60} / D_{10}$  Coeficiente de uniformidad del suelo.

## 2.3 Modelos bidimensionales para el estudio

Los modelos bidimensionales (2D) consideran las variaciones en las dos direcciones del plano horizontal. Las variaciones de magnitudes importantes como la velocidad en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como único valor. Por lo cual estos modelos son aplicables donde la variación vertical de la velocidad es mínima, es decir en cuerpos fluviales con aguas superficiales o poco profundas. (Palavecino Ramos 2015)

Los modelos bidimensionales básicamente sirven para el cálculo de cota de agua y velocidad, el software elegido para este trabajo ha sido IBER ya que es un software libre. Que se fundamenta en las ecuaciones de flujo variable en lámina libre o ecuaciones bidimensionales de Barré de Saint Venant, en las cuales se asume una distribución equitativa de presiones y una distribución uniforme de velocidades las cuales se cumplen habitualmente en ríos y estuarios. (Flumen et al. 2003)

Las ecuaciones de Saint Venant son obtenidas a partir de un promedio en profundidad de las ecuaciones tridimensionales de Reynolds. Es necesario considerar las siguientes hipótesis para simplificar las ecuaciones a 2D:

- El calado del agua debe ser pequeño en comparación a las otras dimensiones.
- Se debe considerar la distribución hidrostática de presiones en la vertical.
- La pendiente debe ser pequeña.

Las componentes verticales de la velocidad y la aceleración se consideran despreciables con respecto a las otras componentes. (Palavecino Ramos 2015)

En base a las hipótesis y consideraciones anteriores, las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hU_y)}{\partial y} = M_s \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - gh\frac{\partial h}{\partial x} + 2\Omega\text{sen}\lambda U_y + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}^e) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy}^e) + M_x \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_y^2) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - gh\frac{\partial h}{\partial y} - 2\Omega\text{sen}\lambda U_x + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy}^e) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}^e) + M_y \quad (12)$$

Donde  $U_x$  y  $U_y$  son las velocidades promediadas en profundidad,  $\tau_s$  es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento,  $\tau_b$  es la fricción debido al rozamiento de fondo,  $\rho$  es la densidad del agua,  $\Omega$  es la velocidad angular de la tierra,  $\lambda$  es la latitud del punto considerado,  $h$  representa la altura del agua y  $M_s, M_x, M_y$  son los términos de masa y momento, a través de las cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.  $\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$  son las tensiones efectivas horizontales. (Flumen et al. 2003)

Se incluyen los términos fuente: presión hidrostática, pendiente del fondo, tensiones tangenciales y turbulentas, rozamiento del fondo, rozamiento superficial por viento, precipitación, infiltración.

Se puede realizar una simplificación a las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, esto se puede lograr descartando: la fuerza de Coriolis que no es representativa en el caso de ríos, tensiones efectivas y tensiones producto del viento en superficie libre. Pueden escribirse entonces, de la siguiente manera:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hUV) = gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hV^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hUV) = gh(S_{oy} - S_{fy}) \quad (15)$$

IBER utiliza el método de volúmenes finitos, que básicamente en cada punto de una malla de discretización del espacio fluido construye un volumen de control que no se superpone con los de los puntos vecinos, por lo que el volumen total resulta ser la suma de los volúmenes de control. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control. La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizadas resultante, es que la solución obtenida satisface en forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla. (Oro 2012)

A continuación, se explica el método de volúmenes finitos expuesto por los desarrolladores de IBER (Universidad de la Coruña, Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería).

Se utiliza como ejemplo la ecuación de conservación de masa en 1D:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

Donde  $h$  es la profundidad y  $Q$  es el caudal. Esta ecuación discretizada en un elemento de longitud  $\Delta x$  se escribe de la siguiente manera, y expresa un balance entre el caudal que ingresa y sale de un elemento y la variación de la altura del agua en dicho elemento.

$$h_i^{n+1} = h_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(Q_r - Q_l) \quad (17)$$

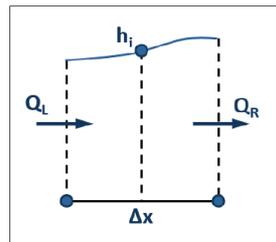
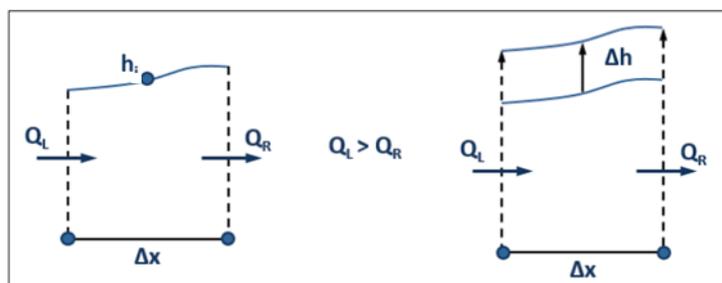


Figura 9. Discretización de un elemento. (Fuente CIMNE, UdC, UPC)

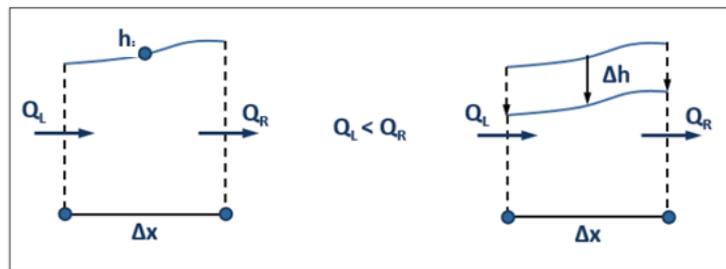
Donde:  $Q_l$  caudal que ingresa,  $Q_r$  caudal de salida,  $h_i$  calado en el medio del elemento,  $\Delta t$  intervalo de tiempo durante el cual se realiza el balance de masa,  $\Delta x$  tamaño del elemento en el cual se realiza el balance de masa.

$$h_i^{n+1} = h_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(Q_r - Q_l) \quad (18)$$

Si el caudal que ingresa en el elemento es mayor al caudal de salida, el calado aumenta como se muestra en la siguiente gráfica:



De igual forma cuando el caudal de salida es mayor al de entrada, el calado disminuye, como se muestra a continuación:



El análisis anterior se ha realizado para la ecuación de conservación de masa, sin embargo, se puede considerar para otro tipo de fluidos y en dos dimensiones.

Para la discretización temporal de las ecuaciones de flujo está basado en esquemas implícitos y explícitos. Los esquemas implícitos son incondicionalmente estables, mientras que en los esquemas explícitos su estabilidad está restringida a la condición CFL. (Palavecino Ramos 2015)

Esta condición indica el máximo valor del tiempo ( $\Delta t$ ) utilizado para la integración temporal, está representado por la siguiente ecuación:

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{U+c} \quad (19)$$

Dónde:  $\Delta x$  tamaño de la malla de calculo,  $U$  velocidad del flujo, y  $c$  la celeridad de la onda dinámica del flujo. Para que un esquema explicito sea estable, la condición de Courant debe cumplir que:  $0 \leq CFL \leq 1$ .

Cuando el parámetro sea mayor podrían aparecer problemas de convergencia, sin embargo, el tiempo de cálculo será menor, sin embargo, se recomienda utilizar un CFL de 0.45.

Los esquemas que utiliza IBER para resolver las ecuaciones son los descentrados de primer y de segundo orden. Los de primer orden son bastante estables, pero menos precisos, no así, los de segundo orden son mucho más precisos.

### 2.3.1 Implementación del modelo bidimensional

#### Construcción de geometría

Desde un archivo MDE (formato ASCII) obtenido de la topografía, el modelo IBER construye un RTIN (red irregular de triángulos), para lo cual ha sido ingresado el lado mínimo y máximo de los triángulos, siendo estos valores de 40 cm. y 1 m. respectivamente, además se ingresa también una tolerancia de 10 cm. que es el error que se genera entre el MED original y RTIN creado por IBER.

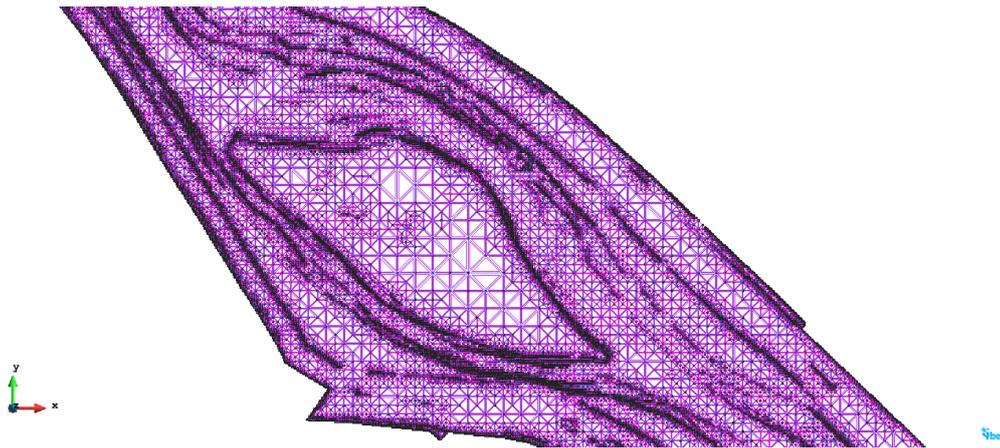


Figura 10. RTIN creado en IBER

### Asignación de condiciones de contorno

Para las condiciones de entrada, ya que el río Tomebamba es un río de montaña, este es propenso a tener grandes velocidades debido a su alta pendiente, pudiendo así suponer que tiene un régimen de flujo supercrítico, hipótesis que será ingresada como dato en el modelo. El caudal que ha sido ingresado corresponde a 140 mc/, y la velocidad inicial ha sido calculada mediante HEC-RAS resultando de 4.76 m/s.

Las condiciones de salida han sido un régimen de flujo supercrítico al igual que la entrada.

### Asignación de condiciones iniciales

Como condición inicial, se ha asumido que al comienzo de la simulación todo el tramo del río tendrá un calado de 0 m.

### Generación de malla de cálculo

Para el estudio se ha utilizado una malla estructurada dividiendo a las superficies en 1 unidad, es decir la malla se creará semejante al RTIN.

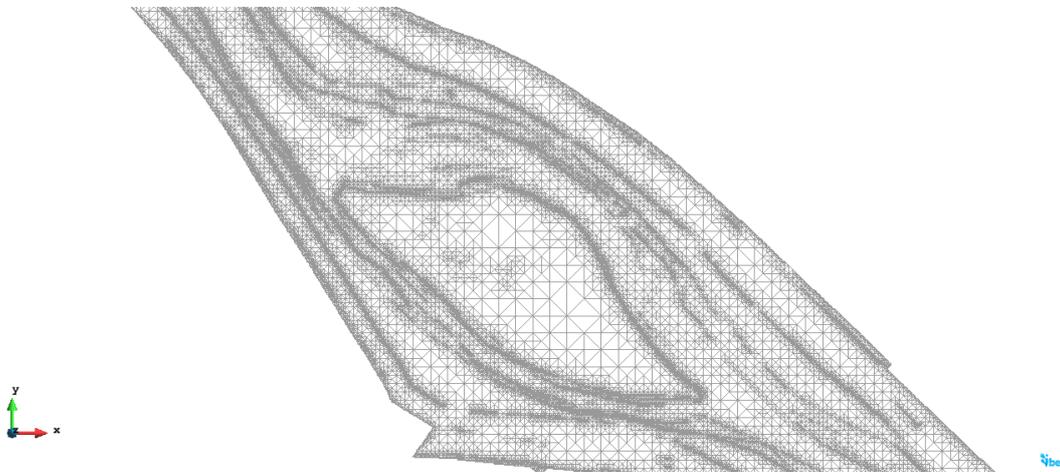


Figura 11. Malla estructurada creada en IBER



### **Asignación de rugosidad**

Los coeficientes de rugosidad para cada uno de los materiales han sido tomados de (Chow, 1994), teniendo en consideración el tipo de canal y descripción.

Río

Para corrientes naturales con un ancho superficial en nivel creciente menor a 30 m., y para ríos limpios, serpenteantes, con algunos pozos y bancos de arena el coeficiente de rugosidad normal puede tomarse como  $n=0.04$ .

Vegetación

Para planicies de inundación con pocos matorrales y árboles, el coeficiente de rugosidad normal es de  $n=0.06$ .

Vías

Ya que las vías correspondientes al tramo de estudio están realizadas en hormigón, el coeficiente de rugosidad normal asignado es de  $n=0.013$ .

### **Asignación de parámetros de entrada**

Parámetros de tiempo

Es necesario definir parámetros como el instante inicial de simulación, tiempo máximo de duración e intervalo de resultados.

El instante inicial de simulación tomará un valor de cero, para el tiempo máximo de simulación se deberá ingresar un tiempo mayor a la duración de un hidrograma; pero ya que en nuestro caso se tiene un caudal constante, este tiempo será mayor al tiempo de recorrido del caudal en el tramo (370 s), adoptándose así el valor de 5400 s, esto con objetivo de que el modelo se estabilice.

Parámetros generales de cálculo

Como parámetros generales tenemos: número de procesadores del ordenador en el que se realizará el cálculo, el esquema numérico el cual será de primer orden ya que presenta mayor estabilidad y una precisión suficiente para el caso de estudio, la condición CFL que ha sido tomada por defecto como 0.45, el límite seco-mojado establecido en 1 cm, el método de secado fijado por defecto y la fricción interna de las paredes no se considerará.

### **2.3.2 Validación del modelo**

Para analizar la relación existente entre los valores calculados por el modelo con los valores obtenidos en campo se ha procedido a validar el modelo, para lo cual, y durante el proceso de calibración se ha contemplado al parámetro de rugosidad de Manning como el parámetro crítico a ser modificado. Para ello, se ha procedido a través de análisis estadísticos comparativos entre los calados y velocidades medidas en campo con los resultados que fueron obtenidos en el modelo.

### 3 Resultados y Discusión

#### 3.1 IBER

##### 3.1.1 Calibración del modelo

La validación se ha realizado en base a tres modelaciones, cada una de ellas con un coeficiente de Manning diferente, para lo cual se eligió valores entre 0.03 y 0.04. El método estadístico a usar fue el de error porcentual. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

| Abscisa | Calado Aforado (m) | Calado de Modelo (m) |         |        | Error Porcentual |         |        |
|---------|--------------------|----------------------|---------|--------|------------------|---------|--------|
|         |                    | n=0.04               | n=0.035 | n=0.03 | n=0.04           | n=0.035 | n=0.03 |
| 6       | 0.39               | 0.34                 | 0.28    | 0.24   | 12.82            | 28.21   | 38.46  |
| 11.5    | 0.42               | 0.38                 | 0.35    | 0.31   | 9.52             | 16.67   | 26.19  |
| 17      | 0.71               | 0.69                 | 0.62    | 0.54   | 2.82             | 12.68   | 23.94  |

Tabla 9. Validación de calado por error porcentual

| Área | Velocidad aforada (m/s) | Velocidad de Modelo (m/s) |         |        | Error Porcentual |         |        |
|------|-------------------------|---------------------------|---------|--------|------------------|---------|--------|
|      |                         | n=0.04                    | n=0.035 | n=0.03 | n=0.04           | n=0.035 | n=0.03 |
| A1   | 0.47                    | 0.45                      | 0.51    | 0.59   | 4.26             | 8.51    | 25.53  |
| A2   | 0.76                    | 0.90                      | 1.08    | 1.21   | 17.91            | 42.11   | 59.21  |
| A3   | 1.01                    | 1.15                      | 1.34    | 1.59   | 13.90            | 32.67   | 57.43  |
| A4   | 1.17                    | 1.30                      | 1.55    | 1.80   | 11.43            | 32.48   | 53.85  |
| A5   | 1.39                    | 1.51                      | 1.74    | 2.07   | 8.63             | 25.18   | 48.92  |
| A6   | 1.44                    | 1.41                      | 1.52    | 1.58   | 2.08             | 5.56    | 9.72   |

Tabla 10. Validación de Velocidad por error porcentual

La asignación de un coeficiente de rugosidad con un valor de 0.04, aunque presenta errores porcentuales elevados, permite la obtención de resultados bastante cercanos a los observados en campo, por lo que es el que más se adapta a las condiciones del río y está acorde con los valores citados en la bibliografía para este tipo de ríos. Por tanto el mapa de asignación de rugosidades se presenta en la figura 12.



Figura 12. Mapa de rugosidades

### 3.1.2 Resultados del modelo

En las condiciones de entrada se adoptó como hipótesis un régimen de flujo supercrítico, sin embargo, en la figura 13 se demuestra que dicha hipótesis es cierta, ya que el número de Froude en la mayor parte del tramo es mayor que 1.



Figura 13. Numero de Froude

Los resultados relevantes para la realización del trabajo se presentan a continuación.

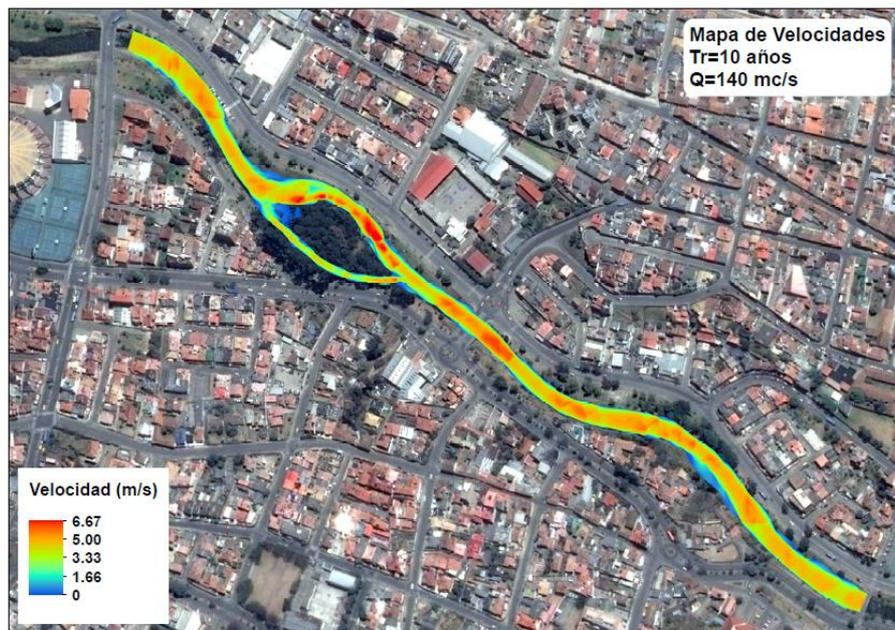


Figura 14. Mapa de velocidades

En la figura 14 se observa que las velocidades en las márgenes están en el intervalo de 0 a 4.5 m/s, mientras que en el cauce se presentan velocidades que alcanzan 6.67 m/s.



Figura 15. Mapa de calados

A lo largo del tramo de estudio, para un caudal de 140 mc/s con periodo de retorno de 10 años, no se producen inundaciones que sobrepasen los límites del cuerpo fluvial, aunque se presentaran calados que alcanzan los 3 m de profundidad.

### 3.2 Estructuras de protección propuestas

Las estructuras de protección propuestas contarán con cimiento, colchón de cimentación y enrocado, siendo necesario un cálculo estructural, geotécnico e hidráulico, sin embargo, el cálculo estructural y geotécnico están fuera del alcance del trabajo, por lo que no han sido descritas, pero sí calculados.

El diseño, según la descripción del problema, será realizado en los tramos donde se presentan velocidades mayores a 3 m/s ya que en base al diagrama de Hjulstrom con un diámetro característico de 4.5 cm, velocidades superiores a esta son las que presentan fenómenos de erosión y transporte.

Para los tramos donde se colocarán obras de protección se ha determinado una sección crítica la cual presenta mayor vulnerabilidad en cuanto a socavación, siendo estos:

- tramo 2, sección en 0+260
- tramo 3, sección en 0+315
- tramo 5, sección en 0+680
- tramo 6, sección en 0+780

Mediante la ecuación (1), con una relación  $b/y$  en todos los casos mayor a 8, el factor de corrección ha sido tomado como 0.77, y con las propiedades hidráulicas obtenidas del modelo IBER; se ha procedido a determinar la fuerza tractiva para cada una de las secciones.

| sección | calado (m) | base (m) | $b/y$ | $R_h$ (m) | $c$  | $\tau$ (KN/m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------|----------|-------|-----------|------|-----------------------------|
| 0+260   | 1.56       | 27.8     | 17.8  | 0.84      | 0.77 | 0.15                        |
| 0+680   | 1.61       | 21.9     | 13.6  | 1.44      | 0.77 | 0.26                        |
| 0+780   | 1.68       | 18.2     | 10.8  | 1.46      | 0.77 | 0.27                        |

Tabla 11. Fuerza tractiva (kN/m<sup>2</sup>)

La profundidad de cimentación ha sido determinada por el cálculo de la profundidad de socavación que presenta el cauce, esta profundidad será calculada a partir del promedio de los resultados que se obtienen de las ecuaciones de Lacey (2) y Blench (3), las mismas que están en función de: el diámetro característico  $d_{50}$  determinado con anterioridad, el calado obtenido del modelo IBER y el caudal, que fue calculado a partir de la ecuación de Manning.

Para el cálculo de la socavación en cada una de las secciones las abscisas pertenecientes a la margen han sido discretizadas en intervalos más pequeños debido a su importancia en el diseño de las protecciones. A continuación se presenta, tanto la sección original como la socavada en cada una de las secciones descritas anteriormente, los cálculos necesarios para cada una de las secciones se presentan en las tablas contenidas en el anexo 3.

### Sección en 0+260

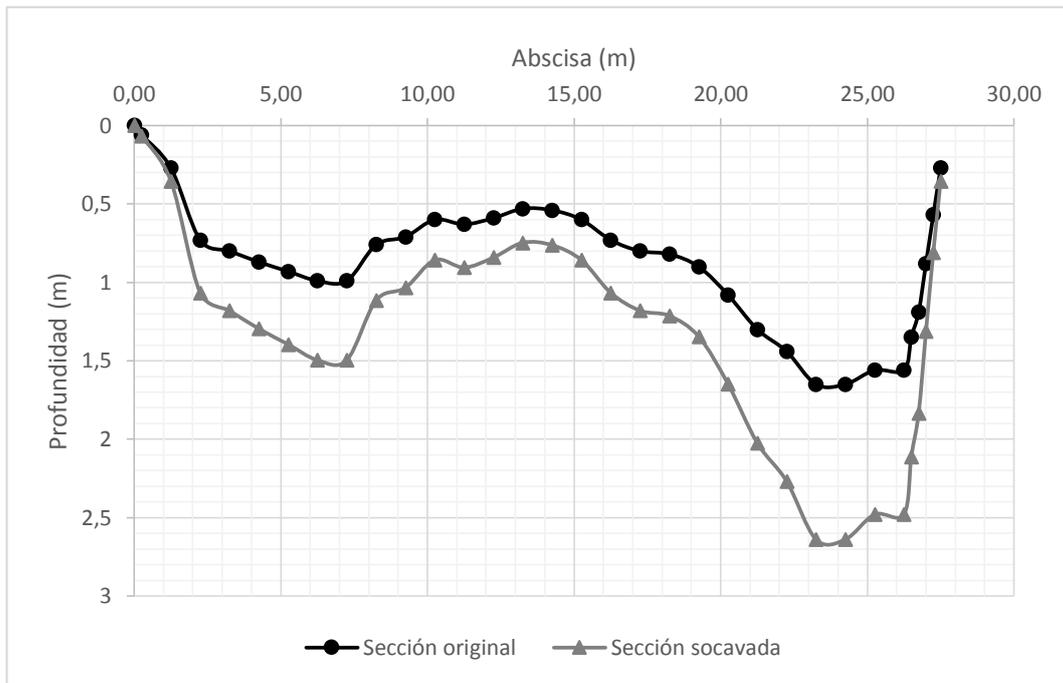


Figura 16. Socavación general - Sección 0+260

### Sección en 0+315

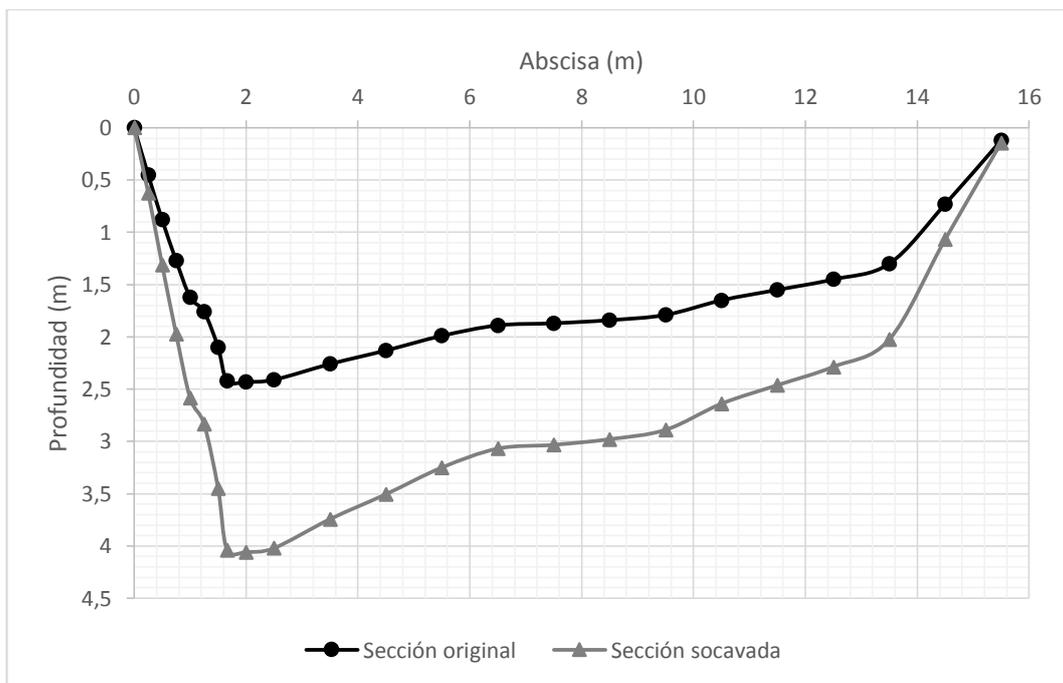


Figura 17. Socavación general - Sección 0+315

### Sección en 0+680

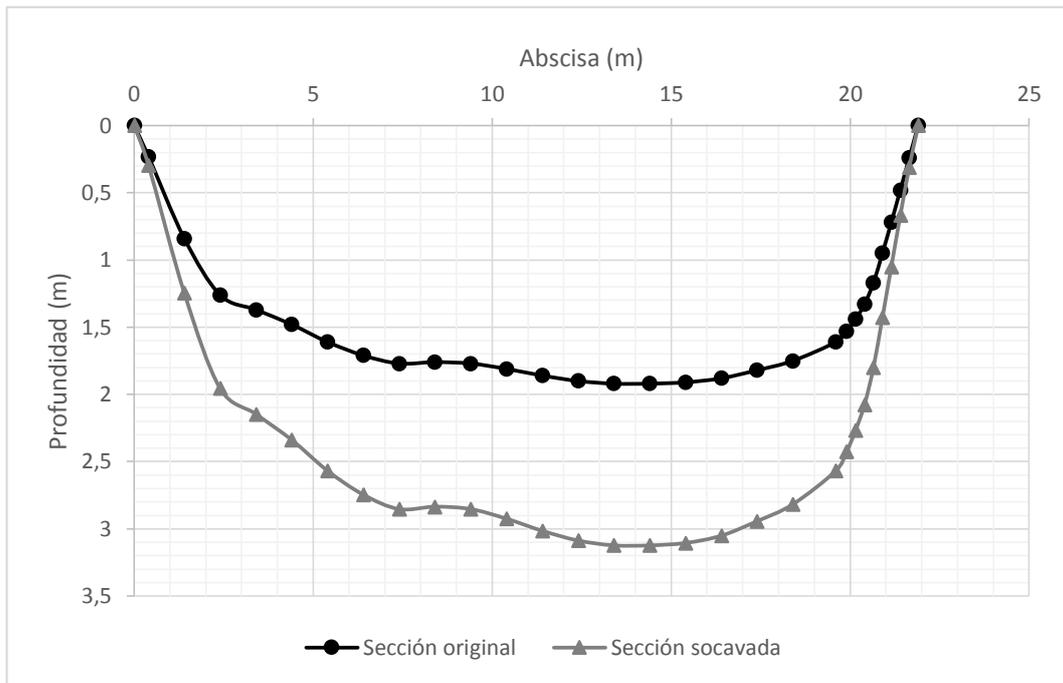


Figura 18. Socavación general - Sección 0+680

### Sección en 0+780

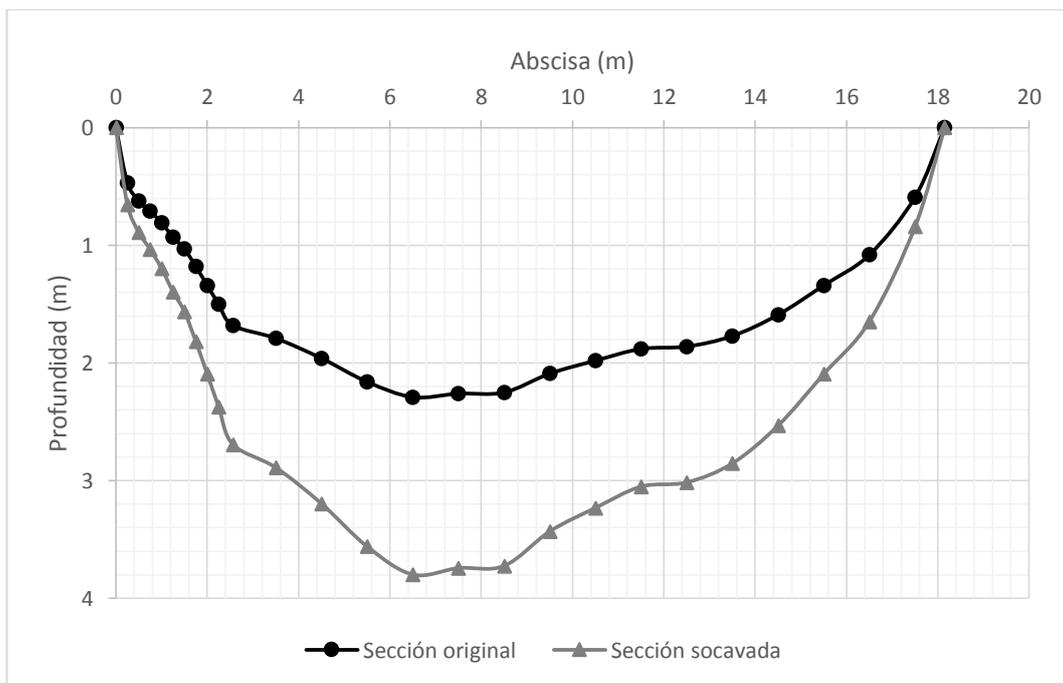


Figura 19. Socavación general - Sección 0+780

### 3.2.1 Enrocado

El enrocado estará colocado de dos formas, en el cauce en forma de colchones de cimentación, que tienen como función evitar la socavación local una vez implementada la estructura, su espesor estará diseñado en base a la velocidad de la corriente (Suárez 2001).

| Velocidad de la corriente (m/s) | Espesor (m) |
|---------------------------------|-------------|
| 1.5 a 2.5                       | 0.15        |
| 2.5 a 4.5                       | 0.15 a 0.25 |
| 4.5 a 6                         | 0.25 a 0.3  |
| 6 a 7                           | 0.3 a 0.5   |

Tabla 12. Espesor de revestimiento de colchones de gaviones (Fuente: Suarez 2009)

En lo referente a la longitud transversal se puede extender desde 1.5 hasta 2 veces la profundidad de socavación calculada. (Suárez 2001)

Y estarán implementados también en la parte inferior de la margen con el objetivo de precautelar la estabilidad de la protección. El material con el que se realizará el enrocado será la roca andesita existente en el cauce.

Para el cálculo del enrocado es necesario definir parámetros como: velocidad y profundidad obtenidas del modelo IBER en el punto de diseño del enrocado, densidad relativa del material tomada como  $2.8 \text{ t/m}^3$  (Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015) y los factores de corrección de estabilidad, estabilidad y turbulencia, que han sido tomados de la tabla 8 considerando el tipo de estructura y su continuidad.

#### Sección en 0+260

| Método de Pilarczyk                          |             |             |
|--|-------------|-------------|
| Datos  | Margen      | Lecho       |
| Velocidad, $V(\text{m/s})$                   | 5.02        | 5.21        |
| Densidad relativa del material, $S$          | 2.8         | 2.8         |
| Gravedad, $g (\text{m/s}^2)$                 | 9.81        | 9.81        |
| Profundidad, (m)                             | 1.56        | 1.56        |
| Factor de corrección de estabilidad $\Phi$   | 0.75        | 0.75        |
| Densidad relativa del revestimiento $\Delta$ | 1.8         | 1.8         |
| Factor de estabilidad $\Psi_{cr}$            | 0.035       | 0.035       |
| Factor de turbulencia, $K_t$                 | 1           | 1           |
| Talud de la orilla, $\alpha$                 | 25          | 0           |
| Angulo de rozamiento interno, $\phi$         | 40          | 40          |
| Angulo de perfil longitudinal, $\beta$       | 1.4         | 1.4         |
| Factor de Profundidad, $k_h$                 | 0.83        | 0.78        |
| Factor de cara del talud, $k_d$              | 0.75        | 1.00        |
| Talud longitudinal, $k_1$                    | 0.97        | 0.97        |
| Factor de pendiente, $k_s$                   | 0.73        | 1.00        |
| Diámetro característico, $D_{50}$ (m)        | <b>0.61</b> | <b>0.45</b> |

Tabla 13. Dimensionamiento de roca - Sección 0+260

**Sección en 0+315**

| Método de Pilarczyk                          |             |             |
|--|-------------|-------------|
| Datos  | Margen      | Lecho       |
| Velocidad, V(m/s)                            | 3.8         | 3.8         |
| Densidad relativa del material, S            | 2.8         | 2.8         |
| Gravedad, g (m/s <sup>2</sup> )              | 9.81        | 9.81        |
| Profundidad, y (m)                           | 2.42        | 2.42        |
| Factor de corrección de estabilidad $\Phi$   | 0.75        | 0.75        |
| Densidad relativa del revestimiento $\Delta$ | 1.8         | 1.8         |
| Factor de estabilidad $\Psi_{cr}$            | 0.035       | 0.035       |
| Factor de turbulencia, Kt                    | 1           | 1           |
| Talud de la orilla, $\alpha$                 | 39          | 0           |
| Angulo de rozamiento interno, $\phi$         | 40          | 40          |
| Angulo de perfil longitudinal, $\beta$       | 1.4         | 1.4         |
| Factor de Profundidad, kh                    | 0.89        | 0.60        |
| Factor de cara del talud, kd                 | 0.20        | 1.00        |
| Talud longitudinal, k1                       | 0.97        | 0.97        |
| Factor de pendiente, ks                      | 0.20        | 1.00        |
| Diámetro característico, D50 (m)             | <b>1.39</b> | <b>0.18</b> |

Tabla 14. Dimensionamiento de roca - Sección 0+315

**Sección en 0+680**

| Método de Pilarczyk                          |                   |             |
|--|-------------------|-------------|
| Datos  | Margen (gaviones) | Lecho       |
| Velocidad, V(m/s)                            | 3.68              | 3.68        |
| Densidad relativa del material, S            | 2.8               | 2.8         |
| Gravedad, g (m/s <sup>2</sup> )              | 9.81              | 9.81        |
| Profundidad, (m)                             | 1.61              | 1.61        |
| Factor de corrección de estabilidad $\Phi$   | 0.75              | 0.75        |
| Densidad relativa del revestimiento $\Delta$ | 1.08              | 1.8         |
| Factor de estabilidad $\Psi_{cr}$            | 0.07              | 0.035       |
| Factor de turbulencia, Kt                    | 1                 | 1           |
| Talud de la orilla, $\alpha$                 | 37.27             | 0           |
| Angulo de rozamiento interno, $\phi$         | 40                | 40          |
| Angulo de perfil longitudinal, $\beta$       | 1.4               | 1.4         |
| Factor de Profundidad, kh                    | 0.82              | 0.65        |
| Factor de cara del talud, kd                 | 0.34              | 1.00        |
| Talud longitudinal, k1                       | 0.97              | 0.97        |
| Factor de pendiente, ks                      | 0.33              | 1.00        |
| Diámetro característico, D50 (m)             | <b>0.61</b>       | <b>0.19</b> |

Tabla 15. Dimensionamiento de roca - Sección 0+680

**Sección en 0+780**

| Método de Pilarczyk                          |             |             |
|--|-------------|-------------|
| Datos  | Margen      | Lecho       |
| Velocidad, V(m/s)                            | 4.37        | 4.37        |
| Densidad relativa del material, S            | 2.8         | 2.8         |
| Gravedad, g (m/s <sup>2</sup> )              | 9.81        | 9.81        |
| Profundidad, (m)                             | 1.68        | 1.68        |
| Factor de corrección de estabilidad $\Phi$   | 0.75        | 0.75        |
| Densidad relativa del revestimiento $\Delta$ | 1.8         | 1.8         |
| Factor de estabilidad $\Psi_{cr}$            | 0.035       | 0.035       |
| Factor de turbulencia, Kt                    | 1           | 1           |
| Talud de la orilla, $\alpha$                 | 30          | 0           |
| Angulo de rozamiento interno, $\phi$         | 40          | 40          |
| Angulo de perfil longitudinal, $\beta$       | 1.4         | 1.4         |
| Factor de Profundidad, kh                    | 0.79        | 0.70        |
| Factor de cara del talud, kd                 | 0.63        | 1.00        |
| Talud longitudinal, k1                       | 0.97        | 0.97        |
| Factor de pendiente, ks                      | 0.61        | 1.00        |
| Diámetro característico, D50 (m)             | <b>0.53</b> | <b>0.28</b> |

*Tabla 16. Dimensionamiento de roca - Sección 0+780***3.2.2 Estabilidad de muros**

La estabilidad del muro está sujeta a factores de seguridad que son: al vuelco ( $Cv \geq 1.5$ ), al deslizamiento lateral ( $Cdt \geq 1.5$ ) y al deslizamiento longitudinal ( $Cdl \geq 1.5$ ).

Los factores de seguridad frente al vuelco y al deslizamiento lateral han sido determinados a partir de la teoría del empuje activo de Coulomb y criterios estructurales, mientras que el coeficiente de seguridad frente al deslizamiento longitudinal que, a más de la teoría de Coulomb, emplea también criterios hidráulicos.

A continuación, se describe las variables utilizadas para el cálculo del factor de seguridad frente al deslizamiento longitudinal: la resultante de las fuerzas verticales estará dada por el peso del muro, la proyección del empuje activo y la supresión, el coeficiente de cohesión corregido tomará el valor de 0.5 por seguridad y la resultante de las fuerzas longitudinales estará definida únicamente por el valor de la fuerza tractiva.

**Sección en 0+260**

En esta sección se propone el diseño de un muro krainer, su dimensionamiento y cálculo de estabilidad se presentan en la tabla 17.

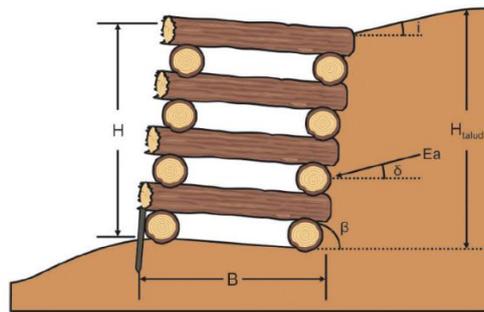


Figura 20. Distribución de esfuerzos y variables de cálculo del empuje activo (Fuente: García Vega et al. 2014)

| Datos   |               |
|---|---------------|
| <b>Muro</b>   |               |
| Altura del muro, H (m)                                    | 1.85          |
| Longitud transversal del muro, Bt (m)                     | 2.00          |
| Longitud longitudinal del muro, Lm (m)                    | 1.00          |
| <b>Suelo</b>  |               |
| Densidad del suelo, $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )            | 1.81          |
| Coefficiente de cohesión, $c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )      | 0.13          |
| Angulo de rozamiento, $\varphi$                           | 34            |
| <b>Talud</b>  |               |
| Altura del talud, Ht (m)                                  | 2.50          |
| Peso específico del agua, $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 9.81          |
| Angulo de inclinación del talud, $\theta$                 | 10.00         |
| Angulo de inclinación del trasdós, $\beta$                | 50            |
| Angulo que forma el plano de la superficie, $i$           | 14            |
| Angulo de rozamiento terreno - trasdós, $\delta$          | 22.7          |
| Anchura equivalente del muro, B (m)                       | 1.97          |
| <b>Cálculos</b>   |               |
| Empuje activo, Ea (kN/m)                                  | 2.56          |
| Empuje hidrostático, Eh (kN/m)                            | 16.79         |
| Subpresión, Sp (kN)                                       | 12.51         |
| Tensión tractiva, $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )             | 0.15          |
| Peso del muro, W(kN/m)                                    | 52.40         |
| Ry, empuje saturado (proyección)                          | 14.54         |
| <b>Seguridad frente al vuelco</b>                         |               |
| Momento Estabilizador, (kN)                               | 89.77         |
| Momento de vuelco, (kN)                                   | 18.20         |
| Coefficiente de seguridad frente al vuelco, Cv            | <b>4.93</b>   |
| <b>Seguridad frente al deslizamiento lateral</b>          |               |
| Coefficiente de fricción suelo-muro                       | 0.42          |
| Coef. de seguridad al deslizamiento lateral, Cdt          | <b>4.50</b>   |
| <b>Seguridad frente al deslizamiento longitudinal</b>     |               |
| Coef. de seguridad al deslizamiento longitudinal, Cdl     | <b>123.10</b> |

Tabla 17. Dimensionamiento de muro krainer

Para el dimensionamiento de los troncos, se ha elegido la madera de eucalipto de la cual se ha obtenido sus propiedades físicas y mecánicas necesarias para el cálculo a flexión y demanda/capacidad que deberá ser mayor a 1. Las propiedades que se presentan a continuación han sido obtenidas de (CTE 2009).

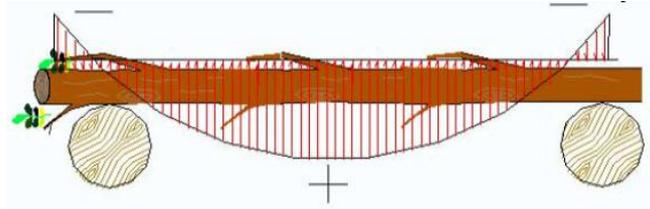


Figura 21. Momentos actuantes en el tronco

| Propiedades de la madera   |          |
|--|----------|
| Densidad del tronco, $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )                        | 0.59     |
| Factor de modificación de la resistencia, $K_{mod}$                    | 0.6      |
| Resistencia característica de la madera, $f_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 40       |
| Coefficiente parcial de seguridad, $\gamma_m$                          | 1.3      |
| Diámetro de troncos, $D$ (m)   | 0.20     |
| Resistencia a la flexión de la madera                                  |          |
| Longitud sometida a flexión  | 1        |
| Momento flector (kN*m)   | 5.55     |
| Modulo resistente (m <sup>3</sup> )                                    | 0.0008   |
| Tensión de cálculo a flexión (kN/m <sup>2</sup> )                      | 7064.93  |
| Resistencia a flexión de la madera, $f_{md}$ (kN/m <sup>2</sup> )      | 18461.54 |
| Demanda / Capacidad  | 2.61     |

Tabla 18. Dimensionamiento del diámetro de tronco

### Sección en 0+680

En esta sección se propone el diseño de un muro de gaviones, el cálculo de estabilidad se presenta a continuación.

| Datos  |      |
|--|------|
| <b>Muro</b>  |      |
| Altura del muro, $H$ (m)                                 | 3.00 |
| Longitud transversal del muro, $B_t$ (m)                 | 4.00 |
| Longitud longitudinal del muro, $L_m$ (m)                | 1.00 |
| <b>Suelo</b>   |      |
| Densidad de relleno, $\rho_r$ (t/m <sup>3</sup> )        | 2.00 |
| Densidad del suelo, $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )           | 1.81 |
| Coefficiente de cohesión, $c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )     | 0.13 |
| Angulo de rozamiento, $\varphi$                          | 34   |
| <b>Talud</b>   |      |
| Altura del talud, $H_t$ (m)                              | 3.30 |
| Peso específico del agua, $\gamma_h$ (t/m <sup>3</sup> ) | 1    |

|  |               |
|--|---------------|
| Factor (impermeable 0 - permeable 1), K                    | 0.70          |
| Angulo de inclinación del talud, $\theta$                  | 0.00          |
| Angulo de inclinación del trasdós, $\beta$                 | 75            |
| Angulo que forma el plano de la superficie, $i$            | 18.4          |
| Angulo de rozamiento terreno - trasdós, $\delta$           | 22.7          |
| Anchura equivalente del muro, B (m)                        | 4.00          |
| <b>Cálculos</b>  |               |
| Empuje activo, $E_a$ (t/m)                                 | 1.98          |
| Empuje hidrostático, $E_h$ (t/m)                           | 4.50          |
| Supresión, $S_p$ (kN)                                      | 4.20          |
| Tensión tractiva, $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )              | 0.27          |
| Peso del muro, $W$ (t/m)                                   | 18.73         |
| $R_y$ , empuje saturado (proyección)                       | 4.35          |
| <b>Seguridad frente al vuelco</b>                          |               |
| $R_x$ , empuje saturado                                    | 1.16          |
| Momento Estabilizador, (kN)                                | 64.70         |
| Momento de vuelco, (kN)                                    | 9.56          |
| Cociente de seguridad frente al vuelco, $C_v$              | <b>6.77</b>   |
| <b>Seguridad frente al deslizamiento lateral</b>           |               |
| Coeficiente de fricción suelo-muro                         | 0.42          |
| Coef. de seguridad al deslizamiento lateral, $C_{dt}$      | <b>9.00</b>   |
| <b>Seguridad frente al deslizamiento longitudinal</b>      |               |
| Coef. de seguridad al deslizamiento longitudinal, $C_{dl}$ | <b>131.64</b> |

Tabla 19. Dimensionamiento del muro de gaviones

### Sección en 0+780

En esta sección se ha propuesto el diseño un muro de empalizadas en escalera, el cual estará compuesto del diseño de la estabilidad y el dimensionamiento de troncos.

| Datos  |      |
|--|------|
| <b>Muro</b>  |      |
| Altura del muro, H (m)                                   | 3.60 |
| Longitud transversal del muro, $B_t$ (m)                 | 3.85 |
| Longitud longitudinal del muro, $L_m$ (m)                | 1.00 |
| <b>Suelo</b>   |      |
| Densidad del relleno, $\rho_r$ (t/m <sup>3</sup> )       | 2.00 |
| Densidad del suelo, $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )           | 1.81 |
| Coeficiente de cohesión, $c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )      | 0.13 |
| Angulo de rozamiento, $\varphi$                          | 34   |
| <b>Talud</b>   |      |
| Altura del talud, $H_t$ (m)                              | 3.60 |
| Peso específico del agua, $\gamma_h$ (t/m <sup>3</sup> ) | 1    |
| Factor (impermeable 0 - permeable 1), K                  | 0.70 |
| Angulo de inclinación del talud, $\theta$                | 0.00 |
| Angulo de inclinación del trasdós, $\beta$               | 75   |
| Angulo que forma el plano de la superficie, $i$          | 18.4 |
| Angulo de rozamiento terreno - trasdós, $\delta$         | 22.7 |

|   |               |
|---|---------------|
| Anchura equivalente del muro, B (m)                   | 3.85          |
| <b>Cálculos</b>                                       |               |
| Empuje activo, Ea (t/m)                               | 2.36          |
| Empuje hidrostático, Eh (t/m)                         | 6.48          |
| Subpresión, Sp (kN)                                   | 4.85          |
| Tensión tractiva, $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )         | 0.27          |
| Peso del muro, W(t/m)                                 | 20.64         |
| Ry, empuje saturado (proyección)                      | 6.26          |
| <b>Seguridad frente al vuelco</b>                     |               |
| Rx, empuje saturado                                   | 1.68          |
| Momento Estabilizador, (kN)                           | 54.49         |
| Momento de vuelco, (kN)                               | 2.02          |
| Cociente de seguridad frente al vuelco, Cv            | <b>26.98</b>  |
| <b>Seguridad frente al deslizamiento lateral</b>      |               |
| Coefficiente de fricción suelo-muro                   | 0.42          |
| Coef. de seguridad al deslizamiento lateral, Cdt      | <b>6.98</b>   |
| <b>Seguridad frente al deslizamiento longitudinal</b> |               |
| Coef. de seguridad al deslizamiento longitudinal, Cdl | <b>120.88</b> |

Tabla 20. Dimensionamiento de la empalizada

La profundidad de empotramiento y el diámetro tanto de los troncos horizontales como verticales ha sido calculado siguiendo el procedimiento descrito en “Estabilización de taludes mediante muros kramer y empalizadas de troncos” (Hernanz Sánchez et al. 2013).

### 3.2.3 Filtro

Será colocado en cada una de las protecciones. Debido a que se tiene únicamente una muestra de suelo, se realizará un filtro tipo, que constará de un material filtrante y geotextil (filtro francés).

#### Material de filtro

Para establecer el material filtrante como primer paso se ha procedido a determinar los diámetros  $d_{15}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{85}$  del suelo, esto mediante la granulometría realizada, luego de esto se propuso una granulometría del material filtro, con la finalidad de que se cumplan los criterios de diseño existentes para la determinación del material.

| Características del suelo |               | Características del filtro |               |
|---------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| Diámetro                  | Abertura (mm) | Diámetro                   | Abertura (mm) |
| d15                       | 0.19          | d10                        | 4.000         |
| d50                       | 0.45          | d15                        | 7.400         |
| d85                       | 1.83          | d50                        | 11.200        |
|                           |               | d60                        | 12.500        |

Tabla 21. Características granulométricas de materiales

| Criterios de diseño         |              |
|-----------------------------|--------------|
| Material filtro             | <b>4.04</b>  |
| Condición 1                 | <b>38.95</b> |
| Condición 2                 | <b>24.89</b> |
| Criterio de permeabilidad   | <b>38.95</b> |
| Coefficiente de uniformidad | <b>3.13</b>  |

Tabla 22. Condiciones a cumplir para el dimensionamiento del material filtrante

## Geotextil

Ya que  $C_u$  tiene un valor de 3.13 se utiliza  $B = 0.5C_u$  obteniendo  $B = 1.565$  y dando como resultado la abertura media del geotextil menor a 2.9 mm.

## 3.3 Estructuras

Se ha optado por el diseño de tres tipos de protecciones como mencionamos anteriormente, están han sido consideradas por su alta resistencia a la velocidad, ya que según (Hernanz Sánchez et al. 2013), el muro krainer, las empalizadas y los gaviones soportan velocidades de 4.5 m/s, 2.9 m/s y 4 m/s respectivamente.

El diseño definitivo de las protecciones se presentará por secciones:

### 3.3.1 Sección en 0+260

En esta sección se presenta en la base de la margen una velocidad de 5.02 m/s, por lo que no es posible la implantación directamente de alguna técnica de bioingeniería, entonces se ha optado por la realización de un enrocado cuyo límite se encontrara en velocidades menores a 4.5 m/s, la misma que permite la implementación del muro krainer.

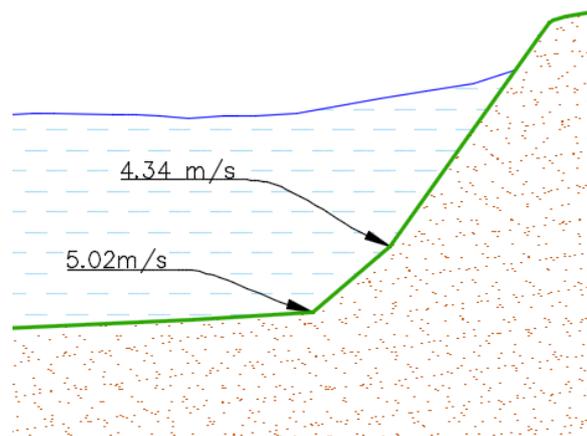


Figura 22. Distribución de velocidades en la sección

El muro krainer estará ubicado desde el inicio de la curva en la abscisa 0+240 hasta el fin de la misma en la abscisa 0+295.

A continuación, se presenta una tabla donde están resumidas las dimensiones del muro, además de un esquema en el que se indica la colocación de cada una de las partes constitutivas del muro.

| Muro krainer                     |        |
|----------------------------------|--------|
| Alto del muro                    | 1.85 m |
| Ancho del muro                   | 2m     |
| Profundidad del cimiento         | 1 m    |
| Altura del enrocado              | 70 cm  |
| Diámetro del enrocado            | 61 cm  |
| Longitud transversal del colchón | 2 m    |
| Diámetro del colchón             | 45 cm  |
| Profundidad del colchón          | 45 cm  |

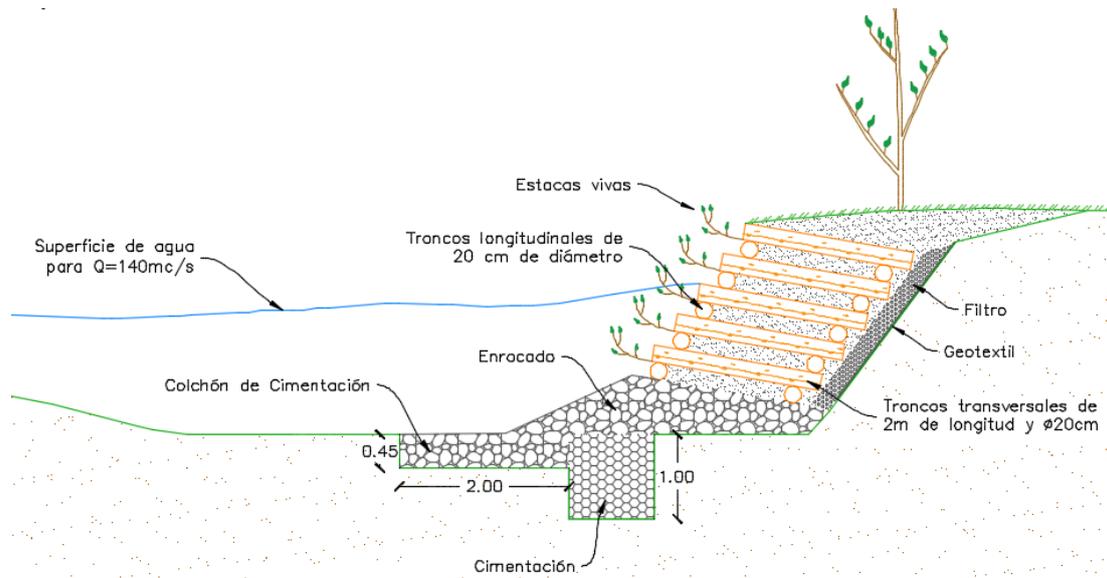


Figura 23. Vista en perfil de un muro krainer

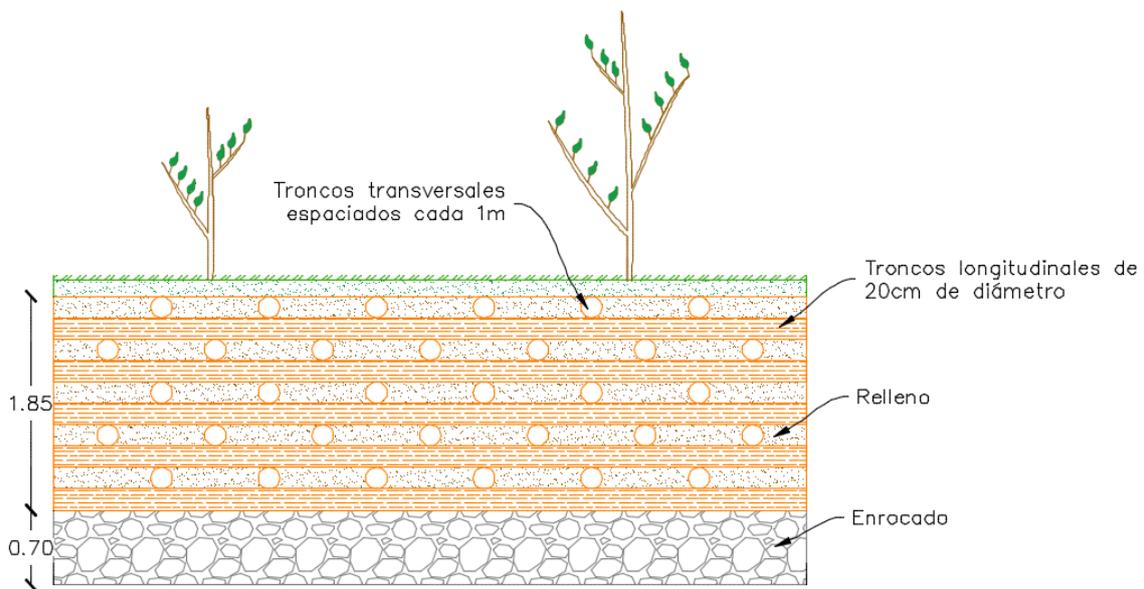


Figura 24. Esquema frontal del muro krainer

### 3.3.2 Sección en 0+315

Esta sección presenta un enrocado, producto de la colocación de este se ha producido socavación local en la base, por lo que es necesario recomendar que se implemente un colchón de cimentación que evite que la socavación continúe.

En los lugares donde el enrocado a colapsado se recomienda restaurar el mismo, utilizando rocas del tamaño semejantes a las del muro construido, ya que se puede observar que han resistido bastante bien al fenómeno de erosión. Es importante que la restauración se realice cuanto antes, ya que en caso de que el talud sufra deslizamientos por erosión podría verse afectada la estructura de la Av. 3 de Noviembre.

El colchón de cimentación iniciará en la abscisa 0+290 y tendrá una longitud de 70 m, la longitud transversal será de 3.5 m, profundidad de 50 cm y se utilizará rocas con diámetro de 20 cm.

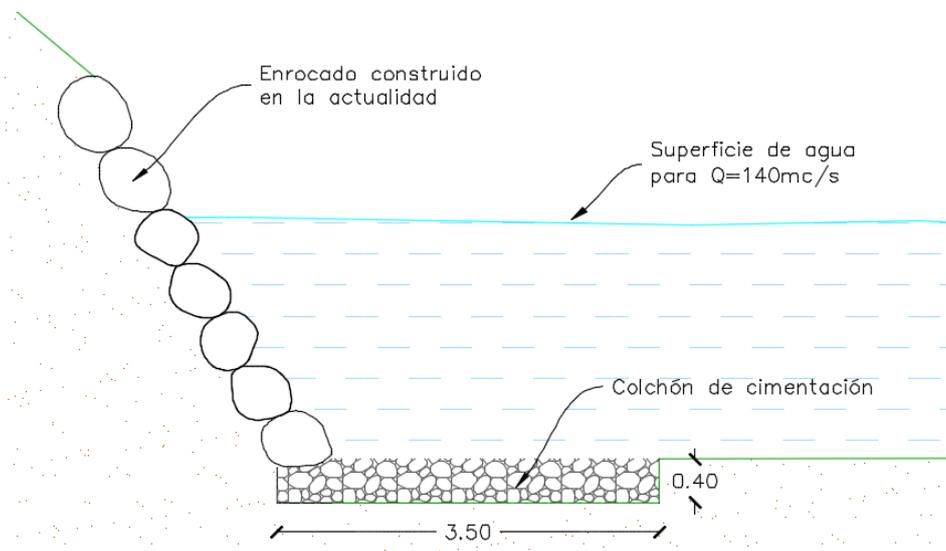


Figura 25. Vista en perfil del colchón de cimentación recomendado

### 3.3.3 Sección en 0+680

En el pie de la margen se presentan velocidades de 3.68 m/s que son consideradas erosivas, se ha elegido implementar un muro de gaviones vegetalizado que actuará de manera eficiente en el rango de velocidades que se presentan en la ribera.

El muro de gaviones estará colocado desde la abscisa 0+660, tendrá una longitud de 60 m y estará asentado directamente sobre el cimiento.

Las dimensiones del gavión y de los demás elementos necesarios para la implementación del muro se muestran en la siguiente tabla, de igual manera se adjunta un esquema en el que se aprecia la forma en la que el muro estará colocado sobre la margen.

| Muro de gaviones                 |       |
|----------------------------------|-------|
| Alto del muro                    | 3 m   |
| Ancho de gavión                  | 1 m   |
| Altura de gavión                 | 50 cm |
| Diámetro de roca de gavión       | 61 cm |
| Profundidad del cimiento         | 1 m   |
| Longitud transversal del colchón | 2 m   |
| Diámetro del colchón             | 19 cm |
| Profundidad del colchón          | 40 cm |

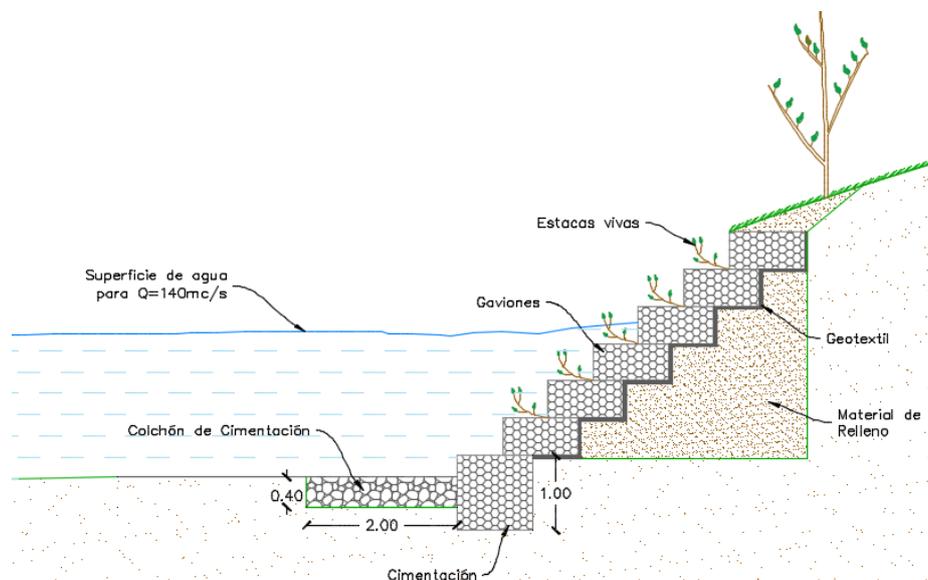


Figura 26. Vista en perfil del muro de gaviones

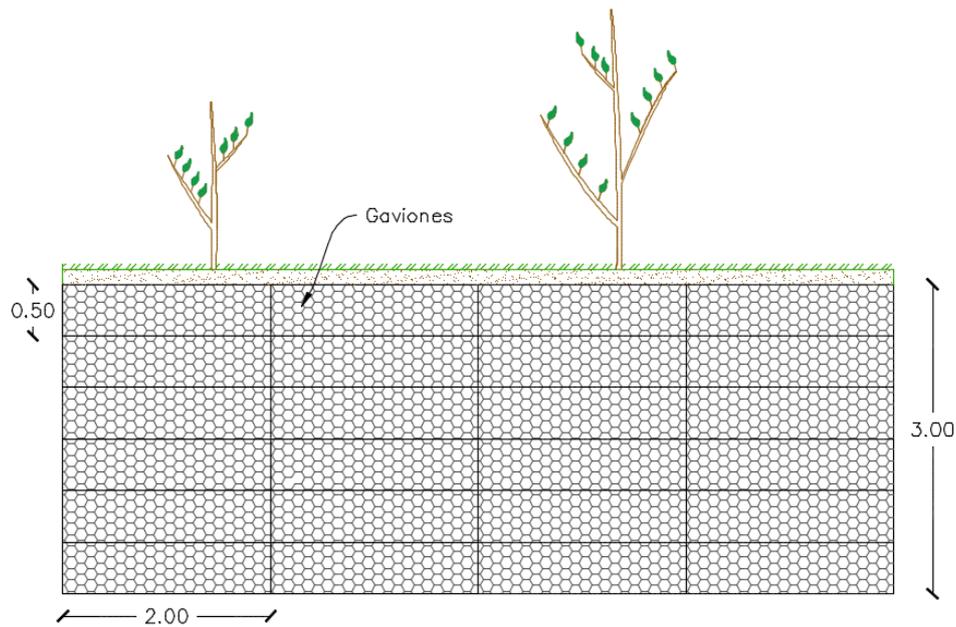


Figura 27. Esquema frontal del muro de gaviones

### 3.3.4 Sección en 0+780

En esta sección se recomienda la construcción de una empalizada de troncos que actúa satisfactoriamente evitando la erosión en un rango de velocidades mayores a 2.9 m/s.

En el pie de la ribera se presentan velocidades de 4.37 m/s, si bien es cierto que la empalizada en teoría pudiese soportar dicha velocidad, es conveniente estar del lado de la seguridad por lo que se ha propuesto realizar en la base de la misma un enrocado.

A continuación, se presenta una tabla en la que se puede apreciar las dimensiones del muro y sus elementos, de igual manera un esquema en el que se diferencia cada uno de los elementos.

| Empalizada de troncos            |       |
|----------------------------------|-------|
| Alto del muro                    | 3 m   |
| Ancho del muro                   | 1 m   |
| Profundidad del cimient          | 1 m   |
| Altura del enrocado              | 1 m   |
| Diámetro del enrocado            | 53 cm |
| Longitud transversal del colchón | 2 m   |
| Diámetro del colchón             | 28 cm |
| Profundidad del colchón          | 60 cm |
| Diámetro de troncos verticales   | 20 cm |
| Diámetro de troncos horizontales | 10 cm |

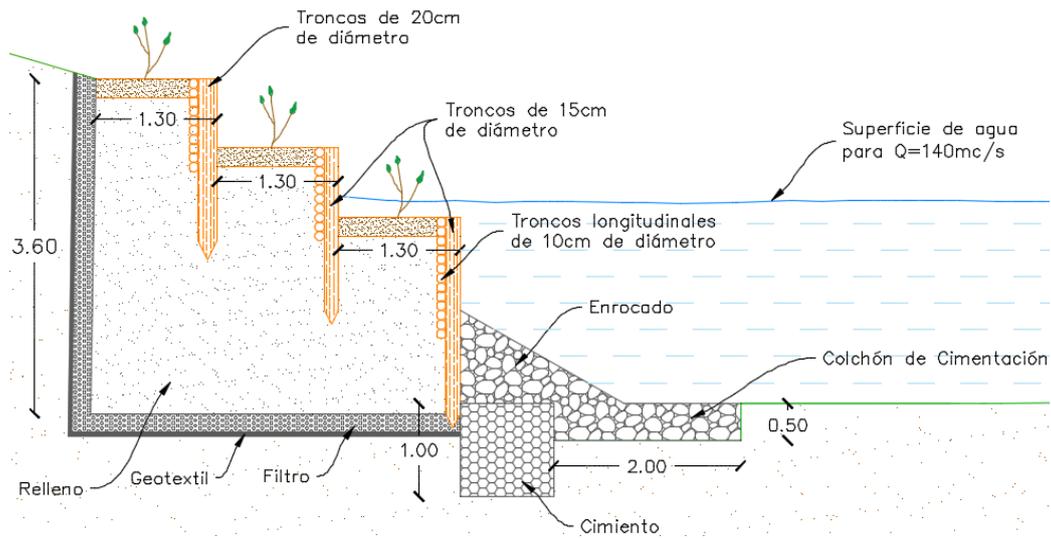


Figura 28. Vista en perfil de la empalizada de troncos

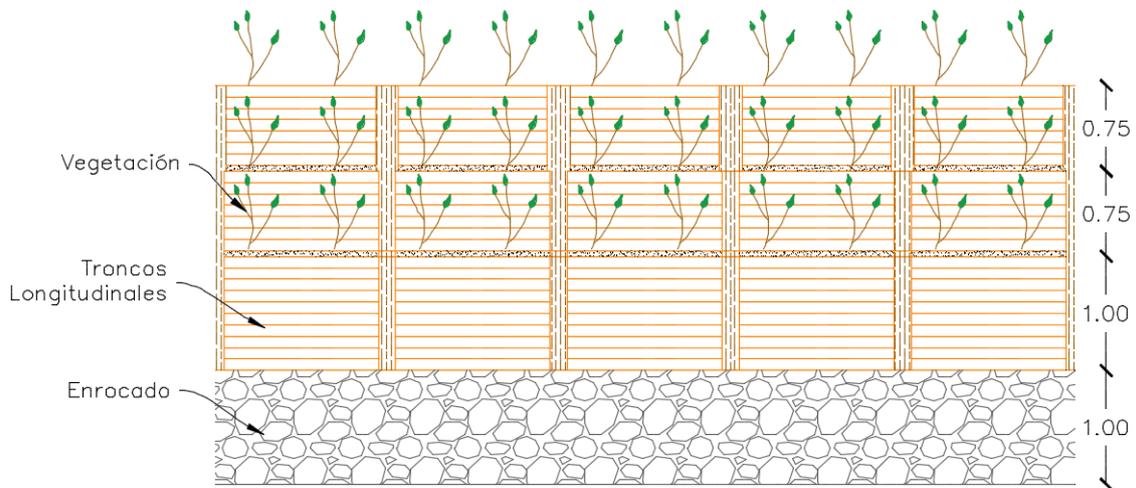


Figura 29. Esquema frontal de la empalizada de tronco



## 4 Conclusiones y recomendaciones

En cuanto a la implementación del modelo, se ha realizado varias opciones de mallado, luego de un análisis a cada una de estas, se puede afirmar que la malla estructurada es la que mejor se adapta a las condiciones del río debido a que presenta mayor estabilidad y menor tiempo de cálculo; esto es importante ya que representa un coste computacional bajo. En lo referente al CFL se puede concluir que, ya que el modelo no tuvo problemas de convergencia, el valor asignado está correcto.

Para la validación del modelo, los valores de velocidad obtenidos mediante el método del flotador son de baja precisión en comparación con otros métodos existentes, sin embargo, este ha sido utilizado debido a que es fácil y accesible. En caso de requerir mayor exactitud en la determinación de la velocidad se recomienda utilizar métodos como: el molinete, o ADV.

Las propiedades mecánicas del suelo, han sido tomadas de tablas que contienen valores aproximados, para lo cual es necesario únicamente una clasificación de suelos, sin embargo, en proyectos de gran magnitud y con suficiente presupuesto para la obtención de las propiedades del suelo es necesario realizar ensayos de triaxial.

En las propiedades mecánicas del suelo para el diseño geotécnico de las protecciones, es importante mencionar que han sido subestimadas debido a que para su clasificación la muestra fue tomada únicamente de la matriz que conforma el suelo, mas no de los clastos que mejoran las propiedades mecánicas del mismo.

Los métodos para el cálculo de la socavación general utilizan la hipótesis de agua clara, considerando que no aportan material sólido en sustitución del erosionado, por lo que conduce a erosiones por exceso. Es recomendable realizar mediciones de la profundidad de socavación en campo para contrastar con los calculados teóricamente.

Ya que el trabajo está enfocado al diseño de protecciones ribereñas, únicamente se ha hecho hincapié en el estudio de las márgenes, sin embargo, debido a que en el cauce se presentan velocidades a las cuales se produce erosión, se recomienda implementar medidas preventivas para evitar dicho fenómeno, como los deflectores de ala.



Siendo el río Tomebamba uno de los más representativos de la ciudad ya que recorre el centro de la urbe, es importante realizar su restauración con técnicas de bioingeniería, las cuales, a más de tener un comportamiento efectivo frente a fenómenos de socavación, están realizadas con elementos naturales que intervienen en los procesos de recuperación fluvial de los ríos, permitiendo a los mismos alcanzar una autosostenibilidad en el futuro.

Cada una de las técnicas han sido elegidas en función: a la vulnerabilidad frente a la erosión y a los requerimientos paisajísticos de cada lugar. Así en la isla se ha colocado un muro krainer porque es una técnica natural que está de acuerdo con la vegetación de la isla, en la curva del tramo 5 se implementó un muro de gaviones el mismo que a más de proteger la margen brindará estabilidad a las estructuras que están tras el mismo, en la curva del tramo 6 se propuso una empalizada de troncos que está en concordancia con la vegetación del parque.

La colocación de las técnicas se ha realizado respetando el espacio fluvial del río, esto con el objetivo de que no se presenten cambios en la geometría del río, ya que dichos cambios pueden ocasionar aumento de velocidad trayendo consigo tasas de erosión más elevadas.

A pesar de la ausencia de estudios en nuestra región sobre las propiedades de las especies vegetales que puedan ser utilizadas para la conservación de las técnicas, el recubrimiento deberá siempre realizarse la con especies propias de la región. Por lo que se recomienda utilizar para la siembra, estacas vivas de cañaro y otras especies arbustivas resistentes a procesos erosivos.

Si bien no es un proyecto de restauración fluvial completo, la colocación de las estructuras diseñadas ayudará en gran parte a que el río empiece a recuperar sus procesos hidrodinámicos que perdió debido al cambio en la morfología del mismo, ya que previene la socavación la cual puede traer consigo degradación del cuerpo fluvial.

En las orillas de la isla se encuentran árboles de eucalipto de gran tamaño, muchos de los cuales presentan la mayoría de sus raíces sin ningún sostenimiento, por lo que en cualquier momento podrían caerse produciendo daños en las funciones hidrodinámicas del cauce y en las viviendas cercanas. Además, producen una inestabilidad en los taludes provocando constantes deslizamientos.

El deslizamiento producido en el tramo 5, no presenta signos de socavación en el pie del talud, por lo que se puede concluir que no se debe a efectos hidráulicos sino más bien geotécnicos, es recomendable así, que el ángulo del talud sea reducido a valores menores que el ángulo de fricción interna del suelo (34 grados).



## 5 Bibliografía

- Ayala, Galiano, Lesly Margarita, Toapaxi Álvarez, y Jorge Augusto. 2010. «Análisis de la socavación en cauces naturales».
- CTE, DBSEM. 2009. «Código técnico de la edificación». *Documento Básico. Seguridad Estructural. Madera* 132.
- Díaz, Alfonso Rodríguez. 2010. *Hidráulica fluvial: fundamentos y aplicaciones socavación*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Flumen, Geama, Cedex, y Cimne. 2003. *Manual de referencia hidráulico*.
- García Vega, A., F. J. Sanz Ronda, J. F. Fuentes Pérez, J. Navarro Hevia, y A. Martínez Rodríguez. 2014. «Bases metodológicas para el cálculo de muros entramados de madera con vegetación o muros Krainer». *Informes de la Construcción* 66(533):e012.
- González Ortega, José María. 2004. «Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta».
- Hernanz Sánchez, M., F. J. SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M. APARICIO MARTÍN, A. SAIZ DE LA HOYA ZAMACOLA, y J. M. GARCÍA-GUIJAS REDONDO. 2013. «Estabilización de taludes mediante muros krainer y empalizadas de troncos». en *Congresos Forestales*.
- Lagasse, P. F. et al. 2009. *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection and Design Guidance. Volume 1*.
- Maza Alvarez, J. A. y M. García Flores. 1996. «Manual de Ingeniería de Ríos». *Series del Instituto de Ingeniería* 584.



- Norma Ecuatoriana de la Construcción. 2015. «Cargas (No Sísmicas)». *Código: NEC-SE-CG. Quito, Ecuador.*
- Oro, Jesús Manuel Fernández. 2012. *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos.* Reverté.
- Palavecino Ramos, Angelo Enrique. 2015. «Modelación bidimensional del flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER».
- Peck, Ralph B., E. W. Hanson, y H. T. Thornburn. 1974. «Foundation Engineering. 2nd». *Edition. New York: John Willy & Sons 7-8.*
- Suárez, Jaime. 2001. «Control de erosión en zonas tropicales». *Bucaramanga, CO. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.*
- Vide, Juan Pedro Martín y Upc Edicions Upc. 2007. *Ingeniería de ríos.* Univ. Politèc. de Catalunya.

## **6 Anexos**

### **Anexo 2. Caudales proyectados**



| Sección "ventilador"<br>MACHALINDA                                   | Área<br>(m <sup>2</sup> ) | Caudal Q (m <sup>3</sup> /s) |        |        | Caudal de<br>desbordamiento<br>(m <sup>3</sup> /s) | Altura de<br>agua (m) | Caudal Q (m <sup>3</sup> /s) |          |        | Zonas de<br>Zonas |
|--|---------------------------|------------------------------|--------|--------|--|-----------------------|------------------------------|----------|--------|-------------------|
|  |                           | T=10                         | T=50   | T=100  |  |                       | Aluvión                      | Problema | Alarma |                   |
| Levantamiento topográfico 08   | 536.45                    | 107.59                       | 145.75 | 163.70 | 601  | 4.52                  | 32.36                        | 85.44    | 266.71 | 543.71            |
| Levantamiento topográfico 38   | 230.46                    | 62.59                        | 125.05 | 141.14 | 222  | 1.30                  | 16.06                        | 38.28    | 76.66  | 127.12            |
| <b>TOMBALINDA</b>  |                           |                              |        |        |  |                       |                              |          |        |                   |
| Levantamiento topográfico 47   | 336.14                    | 159.73                       | 192.06 | 219.37 | 665  | 2.76                  | 66.64                        | 81.42    | 266.51 | 303.37            |
| Estación a med de Madero en Boyasol                                  | 280.36                    | 124.40                       | 171.30 | 195.30 | 501  | 4.40                  | 66.66                        | 85.66    | 255.62 | 251.67            |
| <b>YANUCAY</b>   |                           |                              |        |        |  |                       |                              |          |        |                   |
| Levantamiento topográfico 47   | 410.35                    | 204.72                       | 255.38 | 282.22 | 490  | 3.47                  | 16.36                        | 66.21    | 150.10 | 228.12            |
| <b>QUENGA</b>  |                           |                              |        |        |  |                       |                              |          |        |                   |
| Levantamiento topográfico 10 y<br>Estación, Tombalinda en Uva bambas | 1006.13                   | 507.30                       | 430.70 | 446.60 | 372  | 4.52                  | 3.72                         | 42.26    | 165.86 | 196.69            |

La tabla permite un comparativo entre los caudales de Madero, de Problemas, de Alarma, y de Emergencia y los caudales en diferentes puntos de altura T(=10,50 y 100 años).  
Debe ser contrastado con particular atención la sección del Río Cuenca (fundamental en Ubatumbé); los caudales de Madero, de Problemas, de Alarma, y de Emergencia tienen un periodo de retorno T=10 años, y el caudal de desbordamiento a rala o mesoclimática anual poco en T= 10 años.



### Anexo 3. Cálculos de socavación

Sección en 0+260

|         |    |           |          |       |        |    |
|---------|----|-----------|----------|-------|--------|----|
| abscisa | Δb | calado(m) | q (m3/s) | Lacey | Blench | Hs |
|---------|----|-----------|----------|-------|--------|----|



|       |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 0.00  | 0    | 0    | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.25  | 0.25 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.07 | 0.07 |
| 1.25  | 1    | 0.27 | 0.44 | 0.34 | 0.37 | 0.35 |
| 2.25  | 1    | 0.73 | 2.29 | 1.02 | 1.11 | 1.07 |
| 3.25  | 1    | 0.8  | 2.67 | 1.13 | 1.23 | 1.18 |
| 4.25  | 1    | 0.87 | 3.07 | 1.24 | 1.35 | 1.30 |
| 5.25  | 1    | 0.93 | 3.43 | 1.34 | 1.45 | 1.40 |
| 6.25  | 1    | 0.99 | 3.81 | 1.44 | 1.56 | 1.50 |
| 7.25  | 1    | 0.99 | 3.81 | 1.44 | 1.56 | 1.50 |
| 8.25  | 1    | 0.76 | 2.45 | 1.07 | 1.16 | 1.11 |
| 9.25  | 1    | 0.71 | 2.19 | 0.99 | 1.08 | 1.03 |
| 10.25 | 1    | 0.6  | 1.65 | 0.82 | 0.89 | 0.86 |
| 11.25 | 1    | 0.63 | 1.79 | 0.87 | 0.94 | 0.91 |
| 12.25 | 1    | 0.59 | 1.61 | 0.81 | 0.88 | 0.84 |
| 13.25 | 1    | 0.53 | 1.34 | 0.72 | 0.78 | 0.75 |
| 14.25 | 1    | 0.54 | 1.39 | 0.73 | 0.79 | 0.76 |
| 15.25 | 1    | 0.6  | 1.65 | 0.82 | 0.89 | 0.86 |
| 16.25 | 1    | 0.73 | 2.29 | 1.02 | 1.11 | 1.07 |
| 17.25 | 1    | 0.8  | 2.67 | 1.13 | 1.23 | 1.18 |
| 18.25 | 1    | 0.82 | 2.78 | 1.16 | 1.26 | 1.21 |
| 19.25 | 1    | 0.9  | 3.25 | 1.29 | 1.40 | 1.35 |
| 20.25 | 1    | 1.08 | 4.40 | 1.58 | 1.71 | 1.65 |
| 21.25 | 1    | 1.3  | 6.00 | 1.94 | 2.11 | 2.02 |
| 22.25 | 1    | 1.44 | 7.11 | 2.18 | 2.36 | 2.27 |
| 23.25 | 1    | 1.65 | 8.92 | 2.53 | 2.75 | 2.64 |
| 24.25 | 1    | 1.65 | 8.92 | 2.53 | 2.75 | 2.64 |
| 25.25 | 1    | 1.56 | 8.13 | 2.38 | 2.58 | 2.48 |
| 26.25 | 1    | 1.56 | 8.13 | 2.38 | 2.58 | 2.48 |
| 26.50 | 0.25 | 1.35 | 6.39 | 2.03 | 2.20 | 2.11 |
| 26.75 | 0.25 | 1.19 | 5.18 | 1.76 | 1.91 | 1.84 |
| 27.00 | 0.25 | 0.88 | 3.13 | 1.26 | 1.37 | 1.31 |
| 27.25 | 0.25 | 0.57 | 1.52 | 0.78 | 0.84 | 0.81 |
| 27.50 | 0.25 | 0.27 | 0.44 | 0.34 | 0.37 | 0.35 |

## Sección en 0+315

| abscisa | $\Delta b$ | calado(m) | q (m <sup>3</sup> /s) | Lacey | Blench | Hs   |
|---------|------------|-----------|-----------------------|-------|--------|------|
| 0       | 0          | 0         | 0                     | 0     | 0      | 0.00 |
| 0.25    | 0.25       | 0.45      | 1.02                  | 0.60  | 0.65   | 0.62 |



|      |      |      |       |      |      |      |
|------|------|------|-------|------|------|------|
| 0.5  | 0.25 | 0.88 | 3.13  | 1.26 | 1.37 | 1.31 |
| 0.75 | 0.25 | 1.27 | 5.77  | 1.89 | 2.05 | 1.97 |
| 1    | 0.25 | 1.62 | 8.65  | 2.48 | 2.69 | 2.59 |
| 1.25 | 0.25 | 1.76 | 9.94  | 2.72 | 2.95 | 2.84 |
| 1.5  | 0.25 | 2.1  | 13.34 | 3.31 | 3.59 | 3.45 |
| 1.66 | 0.16 | 2.42 | 16.89 | 3.87 | 4.20 | 4.04 |
| 2    | 0.34 | 2.43 | 17.01 | 3.89 | 4.22 | 4.06 |
| 2.5  | 0.5  | 2.41 | 16.78 | 3.86 | 4.18 | 4.02 |
| 3.5  | 1    | 2.26 | 15.07 | 3.59 | 3.90 | 3.74 |
| 4.5  | 1    | 2.13 | 13.66 | 3.36 | 3.65 | 3.50 |
| 5.5  | 1    | 1.99 | 12.19 | 3.12 | 3.38 | 3.25 |
| 6.5  | 1    | 1.89 | 11.19 | 2.94 | 3.19 | 3.07 |
| 7.5  | 1    | 1.87 | 10.99 | 2.91 | 3.16 | 3.03 |
| 8.5  | 1    | 1.84 | 10.70 | 2.86 | 3.10 | 2.98 |
| 9.5  | 1    | 1.79 | 10.22 | 2.77 | 3.01 | 2.89 |
| 10.5 | 1    | 1.65 | 8.92  | 2.53 | 2.75 | 2.64 |
| 11.5 | 1    | 1.55 | 8.04  | 2.36 | 2.56 | 2.46 |
| 12.5 | 1    | 1.45 | 7.19  | 2.19 | 2.38 | 2.29 |
| 13.5 | 1    | 1.3  | 6.00  | 1.94 | 2.11 | 2.02 |
| 14.5 | 1    | 0.73 | 2.29  | 1.02 | 1.11 | 1.07 |
| 15.5 | 1    | 0.12 | 0.11  | 0.14 | 0.15 | 0.14 |

## Sección en 0+680

| abscisa | $\Delta b$ | calado(m) | q (m <sup>3</sup> /s) | Lacey | Blench | Hs   |
|---------|------------|-----------|-----------------------|-------|--------|------|
| 0       | 0          | 0         | 0                     | 0     | 0      | 0    |
| 0.4     | 0.4        | 0.23      | 0.33                  | 0.28  | 0.31   | 0.30 |



|       |      |      |       |      |      |      |
|-------|------|------|-------|------|------|------|
| 1.4   | 1    | 0.84 | 2.90  | 1.20 | 1.30 | 1.25 |
| 2.4   | 1    | 1.26 | 5.69  | 1.88 | 2.03 | 1.96 |
| 3.4   | 1    | 1.37 | 6.55  | 2.06 | 2.23 | 2.15 |
| 4.4   | 1    | 1.48 | 7.44  | 2.24 | 2.43 | 2.34 |
| 5.4   | 1    | 1.61 | 8.57  | 2.46 | 2.67 | 2.57 |
| 6.4   | 1    | 1.71 | 9.47  | 2.63 | 2.86 | 2.75 |
| 7.4   | 1    | 1.77 | 10.03 | 2.74 | 2.97 | 2.85 |
| 8.4   | 1    | 1.76 | 9.94  | 2.72 | 2.95 | 2.84 |
| 9.4   | 1    | 1.77 | 10.03 | 2.74 | 2.97 | 2.85 |
| 10.4  | 1    | 1.81 | 10.41 | 2.81 | 3.04 | 2.92 |
| 11.4  | 1    | 1.86 | 10.90 | 2.89 | 3.14 | 3.01 |
| 12.4  | 1    | 1.9  | 11.29 | 2.96 | 3.21 | 3.09 |
| 13.4  | 1    | 1.92 | 11.49 | 3.00 | 3.25 | 3.12 |
| 14.4  | 1    | 1.92 | 11.49 | 3.00 | 3.25 | 3.12 |
| 15.4  | 1    | 1.91 | 11.39 | 2.98 | 3.23 | 3.10 |
| 16.4  | 1    | 1.88 | 11.09 | 2.93 | 3.17 | 3.05 |
| 17.4  | 1    | 1.82 | 10.51 | 2.82 | 3.06 | 2.94 |
| 18.4  | 1    | 1.75 | 9.84  | 2.70 | 2.93 | 2.82 |
| 19.6  | 1.2  | 1.61 | 8.57  | 2.46 | 2.67 | 2.57 |
| 19.9  | 0.3  | 1.53 | 7.87  | 2.33 | 2.52 | 2.43 |
| 20.15 | 0.25 | 1.44 | 7.11  | 2.18 | 2.36 | 2.27 |
| 20.4  | 0.25 | 1.33 | 6.23  | 1.99 | 2.16 | 2.08 |
| 20.65 | 0.25 | 1.17 | 5.03  | 1.73 | 1.87 | 1.80 |
| 20.9  | 0.25 | 0.95 | 3.56  | 1.37 | 1.49 | 1.43 |
| 21.15 | 0.25 | 0.72 | 2.24  | 1.01 | 1.09 | 1.05 |
| 21.4  | 0.25 | 0.48 | 1.14  | 0.64 | 0.70 | 0.67 |
| 21.65 | 0.25 | 0.24 | 0.36  | 0.30 | 0.32 | 0.31 |
| 21.9  | 0.25 | 0    | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Sección en 0+780

| abscisa | $\Delta b$ | calado(m) | q (m <sup>3</sup> /s) | Lacey | Blench | Hs   |
|---------|------------|-----------|-----------------------|-------|--------|------|
| 0       | 0          | 0         | 0                     | 0     | 0      | 0    |
| 0.25    | 0.25       | 0.47      | 1.10                  | 0.63  | 0.68   | 0.65 |
| 0.5     | 0.25       | 0.62      | 1.75                  | 0.85  | 0.92   | 0.89 |
| 0.75    | 0.25       | 0.71      | 2.19                  | 0.99  | 1.08   | 1.03 |



|       |      |      |       |      |      |      |
|-------|------|------|-------|------|------|------|
| 1     | 0.25 | 0.81 | 2.73  | 1.15 | 1.25 | 1.20 |
| 1.25  | 0.25 | 0.93 | 3.43  | 1.34 | 1.45 | 1.40 |
| 1.5   | 0.25 | 1.03 | 4.07  | 1.50 | 1.63 | 1.56 |
| 1.75  | 0.25 | 1.18 | 5.10  | 1.74 | 1.89 | 1.82 |
| 2     | 0.25 | 1.34 | 6.31  | 2.01 | 2.18 | 2.09 |
| 2.25  | 0.25 | 1.5  | 7.61  | 2.28 | 2.47 | 2.37 |
| 2.56  | 0.31 | 1.68 | 9.20  | 2.58 | 2.80 | 2.69 |
| 3.5   | 0.94 | 1.79 | 10.22 | 2.77 | 3.01 | 2.89 |
| 4.5   | 1    | 1.96 | 11.89 | 3.07 | 3.33 | 3.20 |
| 5.5   | 1    | 2.16 | 13.98 | 3.41 | 3.70 | 3.56 |
| 6.5   | 1    | 2.29 | 15.41 | 3.64 | 3.95 | 3.80 |
| 7.5   | 1    | 2.26 | 15.07 | 3.59 | 3.90 | 3.74 |
| 8.5   | 1    | 2.25 | 14.96 | 3.57 | 3.88 | 3.72 |
| 9.5   | 1    | 2.09 | 13.23 | 3.29 | 3.57 | 3.43 |
| 10.5  | 1    | 1.98 | 12.09 | 3.10 | 3.36 | 3.23 |
| 11.5  | 1    | 1.88 | 11.09 | 2.93 | 3.17 | 3.05 |
| 12.5  | 1    | 1.86 | 10.90 | 2.89 | 3.14 | 3.01 |
| 13.5  | 1    | 1.77 | 10.03 | 2.74 | 2.97 | 2.85 |
| 14.5  | 1    | 1.59 | 8.39  | 2.43 | 2.64 | 2.53 |
| 15.5  | 1    | 1.34 | 6.31  | 2.01 | 2.18 | 2.09 |
| 16.5  | 1    | 1.08 | 4.40  | 1.58 | 1.71 | 1.65 |
| 17.5  | 1    | 0.59 | 1.61  | 0.81 | 0.88 | 0.84 |
| 18.15 | 0.65 | 0    | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0.00 |