



**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL  
DEL VALLE DEL CAUCA**  
**ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL COMPLEJO DE  
HUMEDALES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA**  
*Convenio Interadministrativo 0144 de 2008*



**DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA  
REGULACIÓN DE FLUJOS Y NIVELES EN LOS  
HUMEDALES LA GUINEA, GUARINÓ, LA BOLSA,  
EL PITAL Y SAN ANTONIO**



**VOLUMEN III**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS**  
**NATURALES Y DEL AMBIENTE**

*Santiago de Cali, Agosto de 2009*



**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA  
DIRECCIÓN TÉCNICA AMBIENTAL**

Convenio Interadministrativo 144 de 2008  
entre la CVC y la Universidad del Valle

**DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA LA  
REGULACIÓN DE FLUJOS Y NIVELES EN LOS  
HUMEDALES LA GUINEA, GUARINÓ, LA BOLSA,  
EL PITAL Y SAN ANTONIO**

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS  
NATURALES Y DEL AMBIENTE  
GRUPO DE HIDRÁULICA FLUVIAL Y MARÍTIMA - HIDROMAR

Santiago de Cali, Agosto de 2009

El presente estudio fue realizado en el marco del Convenio Interadministrativo 144 de 2008 suscrito entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC y la Universidad del Valle.

Este informe fue elaborado por el Grupo de Hidráulica Fluvial y Marítima – HIDROMAR, adscrito a la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle con la participaron de los siguientes profesionales:

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Ing. Carlos Alberto Ramírez Callejas  | Director del Proyecto                |
| Ing. José Luis García Vélez           | Subdirector del Proyecto             |
| Ing. Ricardo Andrés Bocanegra Vinasco | Ingeniero del Grupo de Hidrodinámica |
| Ing. Santiago Santacruz Salazar       | Ingeniero del Grupo de Hidrodinámica |
| Ing. Ruben Darío Arango               | Ingeniero Estructural                |

Personal Auxiliar:

En el presente estudio participaron en calidad de Auxiliares de Ingeniería los estudiantes, Yeni Potes Sánchez e Iván Jojoa, quienes cursan los últimos semestres de Ingeniería Agrícola y Civil, respectivamente.

Debe destacarse la colaboración de los profesionales y técnicos de la CVC quienes participaron desde la fase inicial del Estudio, mediante la concepción de procedimientos, el suministro de información y la revisión de informes. El Comité de Seguimiento de CVC estuvo integrado principalmente por:

|                                      |                      |
|--------------------------------------|----------------------|
| Biól. Maria Isabel Salazar Ramírez   | Coordinadora General |
| Ing. María Clemencia Sandoval García | Comité Técnico       |
| Ing. Álvaro Calero Aguado            | Comité Técnico       |
| Biól. Milton A. Reyes Gutiérrez      | Comité Técnico       |
| Biól. Pedro Nel Montoya Montaya      | Comité Técnico       |

**TABLA DE CONTENIDO**

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2.</b> | <b>ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1       | Funciones de las obras hidráulicas a diseñar  | 3         |
| 2.2       | Características de las obras hidráulicas a diseñar  | 3         |
| 2.3       | Requerimientos técnicos de las obras hidráulicas  | 4         |
| 2.3.1     | Vertederos rectangulares de pared delgada   | 5         |
| 2.3.2     | Compuertas  | 6         |
| <b>3.</b> | <b>CRITERIOS, CONSIDERACIONES Y METODOLOGÍAS PARA EFECTUAR LOS DISEÑOS HIDRÁULICOS Y ESTRUCTURAL Y EL ESTUDIO DE SUELOS</b> | <b>7</b>  |
| 3.1       | Diseño hidráulico   | 7         |
| 3.1.1     | Restricciones que deben considerarse para lograr un adecuado funcionamiento de vertederos de pared delgada                  | 7         |
| 3.1.2     | Cálculo de los caudales a través de las estructuras hidráulicas a construir   | 8         |
| 3.1.2.1   | Cálculo del caudal sobre el vertedero   | 8         |
| 3.1.2.2   | Cálculo del caudal a través de una compuerta  | 9         |
| 3.1.2.3   | Cálculo del caudal a través del vertedero y la compuerta con escurrimiento simultáneo                                       | 12        |
| 3.2       | Requerimiento del estudio de suelos   | 14        |
| 3.3       | Requerimiento del diseño estructural  | 15        |
| <b>4.</b> | <b>DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL LA GUINEA</b>  | <b>16</b> |
| 4.1       | Localización  | 16        |
| 4.2       | Análisis de niveles del río Cauca   | 16        |
| 4.3       | Dimensionamiento de la estructura   | 18        |
| 4.4       | Cálculo de caudales   | 18        |
| 4.4.1     | Cálculo de caudales sobre el vertedero  | 18        |
| 4.4.2     | Cálculo de caudales a través de la compuerta  | 18        |
| 4.4.3     | Cálculo de caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero   | 18        |
| 4.5       | Estudio de suelos   | 20        |
| 4.5.1     | Resultados de la investigación geotécnica   | 20        |
| 4.5.2     | Recomendaciones para la fundación de la estructura  | 23        |
| 4.6       | Diseño estructural  | 25        |
| <b>5.</b> | <b>DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL GUARINÓ</b>  | <b>27</b> |
| 5.1       | Localización  | 27        |
| 5.2       | Análisis de niveles del río Cauca   | 27        |
| 5.3       | Dimensionamiento de la estructura   | 27        |
| 5.4       | Cálculo de caudales   | 30        |
| 5.4.1     | Cálculo de caudales sobre el vertedero  | 30        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.4.2     | Cálculo de caudales sobre la compuerta                                      | 30        |
| 5.4.3     | Cálculo de caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero | 30        |
| 5.5       | Estudio de suelos   | 33        |
| 5.5.1     | Resultados de la investigación geotécnica                                   | 33        |
| 5.5.2     | Recomendaciones para la fundación de la estructura                          | 34        |
| 5.6       | Diseño estructura   | 36        |
| <b>6.</b> | <b>DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL LA BOLSA</b>                 | <b>38</b> |
| 6.1       | Localización  | 38        |
| 6.2       | Dimensionamiento de la estructura   | 38        |
| 6.3       | Cálculo de caudales   | 38        |
| 6.3.1     | Cálculo de caudales sobre el vertedero                                      | 38        |
| 6.3.2     | Cálculo de caudales a través de la compuerta                                | 38        |
| 6.3.3     | Cálculo de caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero | 38        |
| 6.4       | Estudio de suelos   | 40        |
| 6.4.1     | Resultados de la investigación geotécnica                                   | 40        |
| 6.4.2     | Recomendaciones para la fundación de la estructura                          | 43        |
| 6.5       | Diseño estructural  | 45        |
| <b>7.</b> | <b>DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL PITAL</b>                    | <b>48</b> |
| 7.1       | Localización  | 48        |
| 7.2       | Dimensionamiento de la estructura   | 48        |
| 7.3       | Cálculo de caudales   | 49        |
| 7.3.1     | Cálculo de caudales sobre el vertedero                                      | 49        |
| 7.3.2     | Cálculo de caudales a través de la compuerta                                | 49        |
| 7.3.3     | Cálculo de caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero | 49        |
| 7.4       | Estudio de suelos   | 52        |
| 7.4.1     | Resultados de la investigación geotécnica                                   | 52        |
| 7.4.2     | Recomendaciones para la fundación de la estructura                          | 52        |
| 7.5       | Diseño estructural  | 55        |
| <b>8.</b> | <b>CONSIDERACIONES FINALES</b>  | <b>58</b> |

#### **ANEXO 1. ESTUDIO DE SUELOS**

#### **ANEXO 2. RESULTADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL**

**LISTADO DE TABLA**

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Cuadro 3.1 | Coeficientes efectivos de descarga en un verterlo de cresta delgada            | 9  |
| Cuadro 4.1 | Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal La Guinea                   | 20 |
| Cuadro 4.2 | Cálculo del caudal a través de la compuerta                                    | 21 |
| Cuadro 4.3 | Cálculo del caudal con flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta  | 22 |
| Cuadro 4.4 | Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal La Guinea | 26 |
| Cuadro 5.1 | Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal Guarinó                     | 30 |
| Cuadro 5.2 | Cálculo del caudal a través de la compuerta                                    | 31 |
| Cuadro 5.3 | Cálculo del caudal con flujo simultáneo a través del vertedero y la compuertas | 32 |
| Cuadro 5.4 | Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal Guarinó   | 37 |
| Cuadro 6.1 | Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal La Bolsa                    | 40 |
| Cuadro 6.2 | Cálculo del caudal a través de la compuerta                                    | 41 |
| Cuadro 6.2 | Cálculo del caudal con flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta  | 42 |
| Cuadro 6.4 | Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal La Bolsa  | 47 |
| Cuadro 7.1 | Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal Pital                       | 49 |
| Cuadro 7.2 | Cálculo del caudal a través de la compuerta                                    | 50 |
| Cuadro 7.3 | Cálculo del caudal con flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta  | 51 |
| Cuadro 7.4 | Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal Pital     | 56 |
| Cuadro 7.5 | Presupuesto para la reconstrucción del dique en el humedal San Antonio         | 57 |

**LISTADO DE FIGURAS**

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 2.1 | Esquema de la estructura hidráulica a diseñar   | 4  |
| Figura 3.1 | Geometría general de un vertedero de pared delgada                                    | 7  |
| Figura 3.2 | Geometría general de una compuerta plana descargando libremente                       | 9  |
| Figura 3.3 | Coefficiente de contracción en compuertas planas                                      | 11 |
| Figura 3.4 | Geometría general de una compuerta plana con descarga ahogada                         | 11 |
| Figura 3.5 | Cálculo del caudal a través del vertedero y la compuerta con escurrimiento simultaneo | 12 |
| Figura 3.6 | Coefficiente de descarga $C_q^*$  | 13 |
| Figura 4.1 | Curva de duración de niveles del río Cauca frente el humedal Guinea                   | 17 |
| Figura 4.2 | Dimensiones de la estructura hidráulica en el humedal La Guinea                       | 19 |
| Figura 4.3 | Esquema de la fundación recomendada   | 23 |
| Figura 5.1 | Curva de duración de niveles del río Cauca frente el humedal Guarinó                  | 28 |
| Figura 5.2 | Dimensiones de la estructura hidráulica en el humedal Guarinó                         | 29 |
| Figura 5.3 | Esquema de la fundación recomendada   | 34 |
| Figura 6.1 | Dimensiones de la estructura hidráulica en el humedal La Bolsa                        | 39 |
| Figura 6.2 | Esquema de la fundación recomendada   | 44 |
| Figura 7.1 | Dimensiones de la estructura hidráulica en el humedal El Pital                        | 48 |
| Figura 7.2 | Esquema de la fundación recomendada   | 53 |

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los humedales son ecosistemas con importantes valores naturales, sociales y culturales. Entre sus múltiples funciones se tienen las siguientes: (i) sirven de albergue a una significativa cantidad de animales y plantas, (ii) actúan como reguladores de las crecientes de los ríos, (iii) proporcionan recursos naturales y (iv) ayudan a controlar los ciclos de la materia y la calidad del agua.

Debido al aporte de sedimentos realizado por los ríos durante las crecientes y el escurrimiento superficial de la cuenca, los humedales están sometidos a un proceso de colmatación que, en condiciones naturales, ocurre lentamente. Debido a estos procesos sedimentológicos y cambios morfológicos las madrevejas evolucionan gradualmente a pantanos, luego a chircales, posteriormente a pastizales y finalmente a bosques.

En muchos de los humedales del Valle alto del río del Cauca este proceso de colmatación se ha visto dramáticamente acelerado debido a intervenciones antrópicas, tales como la deforestación de las cuencas, la construcción de diques riberales, la proliferación de plantas acuáticas, el bombeo de aguas desde y hacia el humedal, la construcción de obras de cierre sin un adecuado control, etc. Como consecuencia de esto, los planes de manejo de los humedales La Guinea, Guarinó, La Bolsa, El Pital y San Antonio han recomendado la construcción de obras hidráulicas para mejorar su hidrodinámica e interacción con el río Cauca.

Debido a esto la CVC ha incluido el diseño de estas obras hidráulicas en los humedales Guinea, Guarinó, La Bolsa, Pital y San Antonio en el “Estudio de la Dinámica del Complejo de Humedales en el Valle Alto del Río Cauca mediante Modelación Matemática para su Ordenamiento, Manejo y Conservación” que adelanta la Universidad del Valle. El presente documento contiene los criterios adoptados, la metodología implementada y los resultados obtenidos durante la realización de tales diseños, los cuales fueron desarrollados conforme a los lineamientos definidos por los planes de ordenamiento de los humedales.

El Capítulo 2 de este informe presenta los aspectos técnicos de las obras hidráulicas; se describen detalladamente las funciones que se espera cumplan las obras una vez construidas, sus principales características y los requerimientos técnicos que deben considerarse en las etapas de diseño, construcción y operación.

El Capítulo 3 contiene los criterios y las metodologías implementadas para efectuar los diseños hidráulico y estructural y el estudio de suelos; se describen las restricciones que deben considerarse en el diseño de los vertederos de pared delgada, las formulaciones empleadas para calcular los caudales sobre el vertedero y a través de las compuertas y los requerimientos del estudio de suelos y del diseño estructural.

Los Capítulos 4, 5, 6 y 7 presentan los diseños hidráulicos, los resultados del estudio de suelos y los diseños estructurales de las obras en los humedales La Guinea, Guarinó, La Bolsa y El Pital, respectivamente. Al final de cada uno de estos capítulos se presentan los planos para construcción tanto de la obra en concreto como de la compuerta metálica.

El Capítulo 8 presenta algunas consideraciones finales de los diseños efectuados así como algunas recomendaciones generales.

## **2. ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS**

En este capítulo se describen las funciones que cumplirán las obras a diseñar, las características de las mismas y las recomendaciones generales que deben tenerse en cuenta en las etapas de diseño, construcción y operación con el fin de garantizar su adecuado funcionamiento.

### **2.1 Funciones de las obras hidráulicas a diseñar**

Entre las principales funciones que deben cumplir las obras a diseñar se tienen las siguientes:

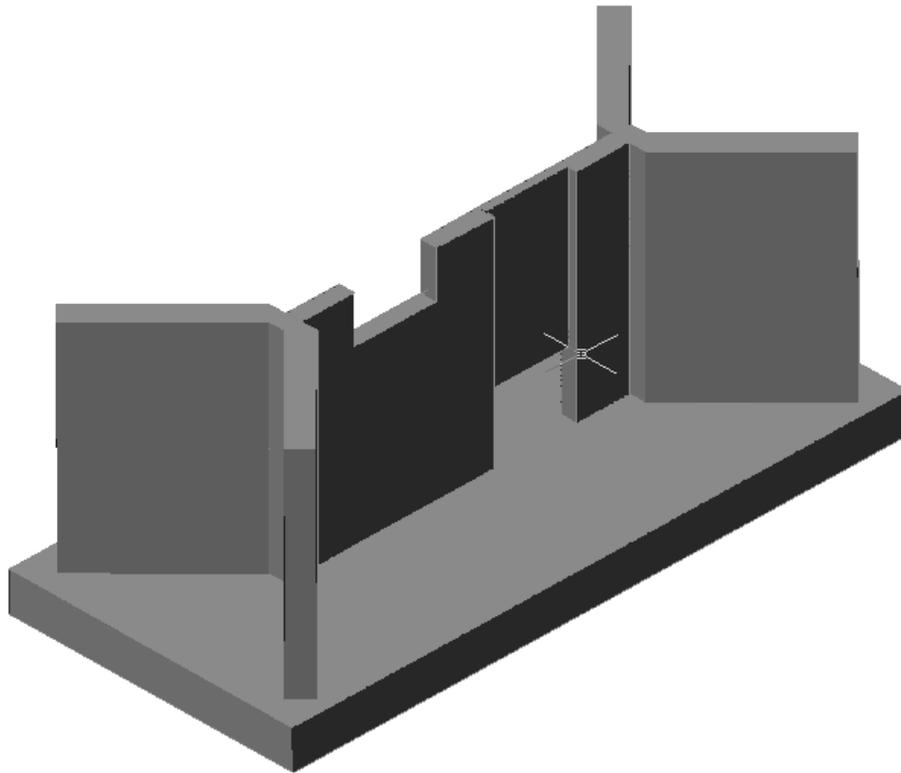
- Mejoramiento de la hidrodinámica del humedal. Las estructuras planteadas permitirán mejorar el comportamiento hidrodinámico del humedal por cuanto brindan la posibilidad de regular la entrada y salida de determinados volúmenes de agua desde y hacia el río Cauca de acuerdo con las características hidrológicas del período estacional.
- Garantizar la permanencia de un nivel y un volumen de agua al interior del humedal. La operación programada de las estructuras permitirá mantener en determinados valores los niveles y los volúmenes de agua en épocas de verano, aunque debe aclararse que debido a la infiltración estos valores podrían variar.
- Control de sedimentos de fondo. En los períodos en los que el nivel de agua del humedal sea superior al del río, la apertura de la compuerta generará un incremento en las velocidades del flujo, lo cual ocasionará un arrastre de los sedimentos depositados en el canal de conexión cerca a la estructura.

### **2.2 Características de las obras hidráulicas a diseñar**

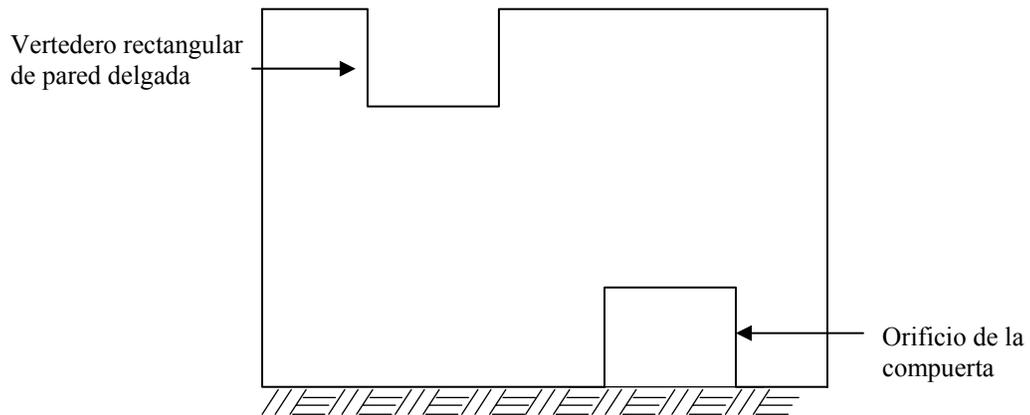
Las obras hidráulicas a diseñar corresponden a estructuras mixtas conformadas por un vertedero rectangular de pared delgada y una compuerta plana vertical deslizante (Figura 1). Un vertedero es una estructura que obstruye y represa el flujo para provocar su descarga sobre ella originando una lámina vertiente con líneas de flujo fuertemente curvadas. Los vertederos de pared delgada son aquellos cuya altura es superior a 1,5 veces su ancho; estos vertederos permiten medir en forma precisa un amplio rango de caudales por cuanto su margen de error es inferior al 5 % (Vega, 2004) y su construcción es relativamente sencilla y económica.

Una compuerta plana es un tablero plano vertical deslizable utilizado para el control del flujo de caudales en canales, tuberías, esclusas, presas y derivaciones; normalmente las compuertas se deslizan por ranuras o guías laterales que le sirven de apoyo y para accionarlas deben vencerse la fuerza de rozamiento.

**Figura 1. Esquema de la Estructura Hidráulica a Diseñar**



**a. Isometría de la Estructura**



**b. Vista Frontal de la Pantalla**

Nota: dimensiones en metros

### 2.3 Requerimientos técnicos de las obras hidráulicas

Para garantizar el normal funcionamiento de las estructuras a diseñar es necesario considerar los lineamientos o criterios que se presentan a continuación.

### **2.3.1 Vertederos rectangulares de pared delgada**

Con el fin de garantizar una medición precisa del caudal en este tipo de vertederos se deben cumplir las siguientes condiciones:

#### **Características de la Estructura**

- La cara aguas arriba del vertedero debe ser instalada o fundida verticalmente.
- Con el fin de garantizar que el flujo que pasa sobre la cresta del vertedero tenga la misma profundidad en todos los puntos, ésta debe ser recta y estar nivelada en forma completamente horizontal.
- La estructura, por ser de pared delgada, puede deteriorarse con relativa celeridad, por lo cual la calibración para el cálculo de caudales puede verse afectada. Debido a esto es necesario realizar tareas de mantenimiento periódicas.

#### **Características del flujo**

- El flujo no debe presentar transporte abundante de material flotante para evitar posibles obstrucciones
- El material decantado en el canal, frente al vertedero y aguas arriba de él, debe ser retirado periódicamente para no afectar la capacidad de descarga del canal de conexión.
- Para calcular la relación entre el caudal y la altura del agua sobre la cresta del vertedero se realizan las siguientes suposiciones del comportamiento del flujo:
  - Aguas arriba del vertedero el flujo es uniforme y se tiene una distribución hidrostática de presiones en la profundidad ( $p=\rho gh$ ).
  - La superficie libre del agua es horizontal hasta el vertedero y las partículas que pasan sobre él se mueven horizontalmente (realmente la superficie del agua se abate al aproximarse al vertedero)
  - La presión de la lámina vertiente sobre el vertedero es igual a la atmosférica, es decir, la lámina de líquido se encuentra completamente aireada (Figura 2). Si no se presenta esta condición, la precisión del vertedero resulta seriamente afectada.
  - Los efectos de viscosidad y tensión superficial son despreciables.

### **Características del Canal**

- El canal de aproximación debe tener un borde libre suficientemente grande para evitar desbordamientos aguas arriba debido al remanso generado por el vertedero.
- El canal de aproximación debe tener una pendiente uniforme y entre suave y moderada, dado que pendientes demasiado altas ocasionan resaltos hidráulicos (Vega, 2004).
- El sitio en el que se ubique el vertedero debe ser de fácil identificación y acceso.
- El vertedero debe ser ubicado en un tramo recto del canal.
- En la zona en la que se ubique el vertedero el canal no debe presentar perturbaciones, remolinos, remansos, cambios bruscos de sección, entradas o salidas de flujo u obstrucciones.

### **2.3.2 Compuertas**

Para la medición de caudales mediante compuertas se realizan las siguientes asunciones:

- No se presentan pérdidas de energía importantes entre la sección aguas arriba y la sección aguas abajo de la compuerta.
- El flujo es incompresible, permanente y uniforme.
- Lejos de la compuerta se presenta una distribución hidrostática de presiones, y en las paredes y el fondo del canal se presentan tensiones cortantes nulas.

Adicionalmente, el flujo de aproximación a la compuerta debe tener régimen subcrítico y el de salida régimen supercrítico.

### 3. CRITERIOS, CONSIDERACIONES Y METODOLOGÍAS PARA EFECTUAR LOS DISEÑOS HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL Y EL ESTUDIO DE SUELOS

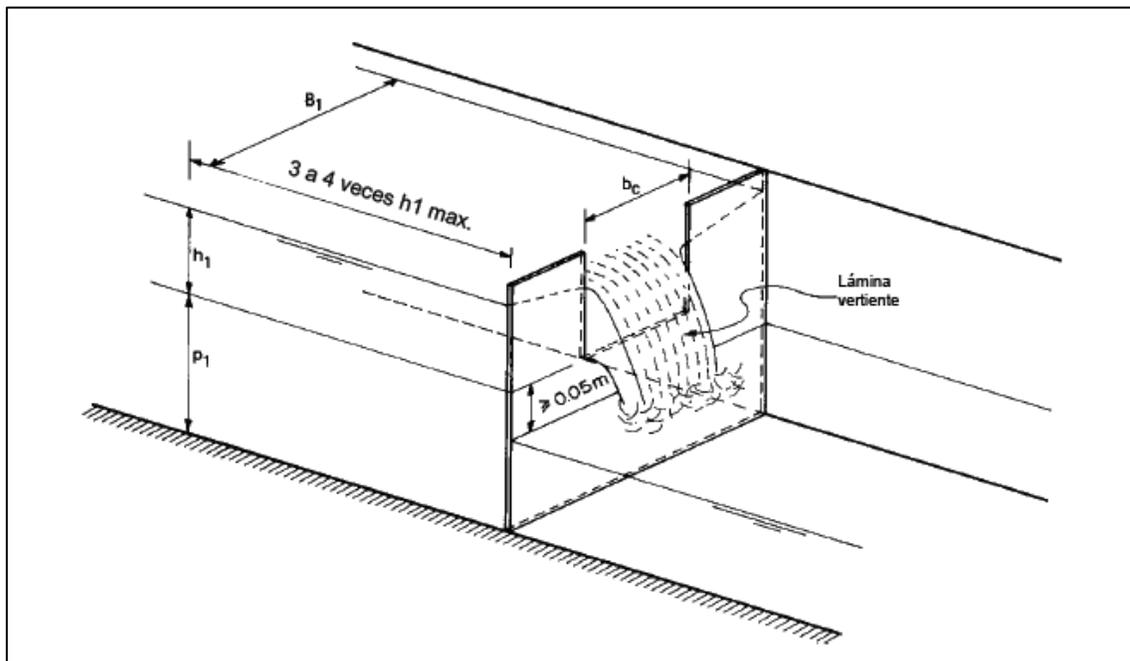
El presente capítulo presenta los aspectos a tener en cuenta para realizar el diseño de las obras hidráulicas que se construirán en los canales de conexión entre el río Cauca y los humedales Guinea, Guarinó, La Bolsa y El Pital. Se incluyen las restricciones, limitaciones o rangos de operación que deben considerarse para lograr un adecuado funcionamiento de los vertederos, las formulaciones teóricas que permiten calcular los caudales que pasarán a través de las compuertas y los vertederos y los parámetros que deben analizarse en el estudio de suelos y en el diseño estructural.

#### 3.1 Diseño Hidráulico

##### 3.1.1 Restricciones que deben considerarse para lograr un adecuado funcionamiento de vertederos de pared delgada

En la Figura 3.1 se presenta un esquema de la geometría general de un vertedero de pared delgada. Para lograr mediciones confiables del caudal deben tenerse en cuenta las siguientes restricciones:

**Figura 3.1 Geometría General de un Vertedero de Pared Delgada**



1. La diferencia entre el ancho del canal,  $B_1$ , y el ancho del vertedero,  $b_c$ , debe ser superior a 4 veces la altura de la carga sobre el vertedero,  $h_1$ ; numéricamente:  $B_1 - b_c \geq 4h_1$ .

2. La razón entre la altura de la carga sobre el vertedero,  $h_1$ , y la profundidad hasta la cresta del vertedero,  $p_1$ , debe ser inferior a 0,5; numéricamente:  $h_1/p_1 \leq 0.5$ .
3. La razón entre la altura de la carga sobre el vertedero,  $h_1$ , y el ancho de la cresta del vertedero,  $b_c$ , debe ser inferior a 0,5; numéricamente:  $h_1/b_c \leq 0.5$ .
4. La altura de la carga sobre el vertedero,  $h_1$ , debe ser mayor a 3 cm e inferior a 60 cm; numéricamente:  $3 \text{ cm} \leq h_1 \leq 60 \text{ cm}$ .
5. El ancho de la cresta del vertedero,  $b_c$ , debe ser mayor a 15 cm; numéricamente:  $b_c \geq 15 \text{ cm}$ .
6. La profundidad hasta la cresta del vertedero,  $p_1$ , debe ser mayor a 10 cm; numéricamente:  $p_1 \geq 10 \text{ cm}$ .
7. La altura de la carga sobre el vertedero debe ser medida aguas arriba del vertedero a una distancia entre 3 a 4 veces la carga máxima esperada,  $h_{1\text{max}}$ , ; numéricamente:  $d = 3$  a  $4h_{1\text{max}}$ .

### 3.1.2 Cálculo de los caudales a través de las estructuras hidráulicas a construir

En las obras que se diseñarán puede presentarse flujo de 3 formas diferentes: (i) flujo superior, únicamente sobre el vertedero, (ii) flujo inferior, únicamente a través de la compuerta y (iii) simultáneamente flujo superior a través del vertedero y flujo inferior a través de la compuerta. A continuación se presenta la forma de calcular el caudal en cada uno de estos casos.

#### 3.1.2.1 Cálculo del caudal sobre el vertedero

La ecuación de descarga de un vertedero de pared delgada es la siguiente:

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} b_c h_1^{1,5} \quad (3.1)$$

donde:

$Q$  = Caudal ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )

$C_e$  = Coeficiente efectivo de descarga

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m}/\text{seg}^2$ )

$b_c$  = Ancho de la cresta del vertedero (m)

$h_1$  = Altura de carga sobre el vertedero (m)

El coeficiente efectivo de descarga  $C_e$  se calcula de acuerdo con las ecuaciones planteadas en el Cuadro 3.1:

**Cuadro 3.1 Coeficientes efectivos de descarga en un vertedero de cresta delgada**

| $B_c/B_1$  | $C_e$                  |
|------------|------------------------|
| 1.0        | $0.602+0.075 h_1/p_1$  |
| 0.9        | $0.599+0.064 h_1/p_1$  |
| 0.8        | $0.597+0.045 h_1/p_1$  |
| 0.7        | $0.595+0.030 h_1/p_1$  |
| 0.6        | $0.593+0.018 h_1/p_1$  |
| 0.5        | $0.592+0.011 h_1/p_1$  |
| 0.4        | $0.591+0.0058 h_1/p_1$ |
| 0.3        | $0.590+0.0020 h_1/p_1$ |
| 0.2        | $0.589-0.0018 h_1/p_1$ |
| 0.1        | $0.588-0.0021 h_1/p_1$ |
| $\sim 0.0$ | $0.587-0.0023 h_1/p_1$ |

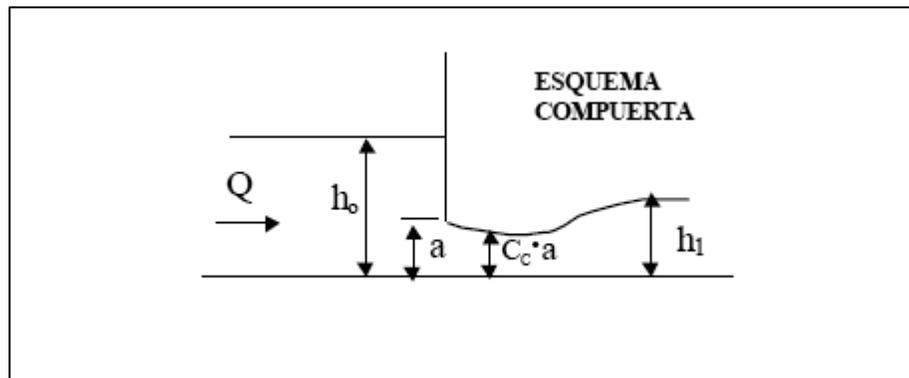
### 3.1.2.2 Cálculo del caudal a través de una Compuerta

El flujo a través de una compuerta puede darse en dos condiciones: (i) descarga libre y (ii) descarga ahogada.

#### Descarga Libre

En la Figura 3.2 se presenta un esquema de la geometría de una compuerta plana, de sección rectangular, sin variación de ancho, con flujo descargando libremente y resalto al pie.

**Figura 3.2 Geometría general de una compuerta plana descargando libremente**



donde:

- Q: Caudal  
a: Abertura de la compuerta

- b: Ancho de la compuerta  
 $C_c$ : Coeficiente de contracción de la compuerta  
 $C_c a$ : Altura del escurrimiento en la sección aguas abajo donde se presenta la vena contraída  
 $H_0$ : Energía en la sección aguas arriba de la compuerta  
 $h_0$ : Profundidad aguas arriba de la compuerta  
 $V_0$ : Velocidad media aguas arriba de la compuerta  
 $g$ : Aceleración de la gravedad

La ecuación para el cálculo del caudal a través de una compuerta es la siguiente:

$$Q = C_c ab \sqrt{2g(H_0 - C_c a)} \quad (3.2)$$

$$H_0 = h_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (3.3)$$

El valor del coeficiente de contracción de la compuerta  $C_c$  puede ser determinado a través de las siguientes ecuaciones:

$$C_c = \left\{ \begin{array}{l} 0.6687 \left( \frac{h_0}{a} \right)^{-0.0425} \rightarrow 3.5 \leq \frac{h_0}{a} \\ -0.554 \ln \left( \frac{h_0}{a} \right) + 0.7033 \rightarrow 2.0 < \frac{h_0}{a} < 3.5 \\ 0.3543 \left( \frac{h_0}{a} \right)^2 - 1.3869 \left( \frac{h_0}{a} \right) + 2.0329 \rightarrow 1.0 \leq \frac{h_0}{a} \leq 2.0 \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

Gráficamente estas ecuaciones se representan en la Figura 3.3.

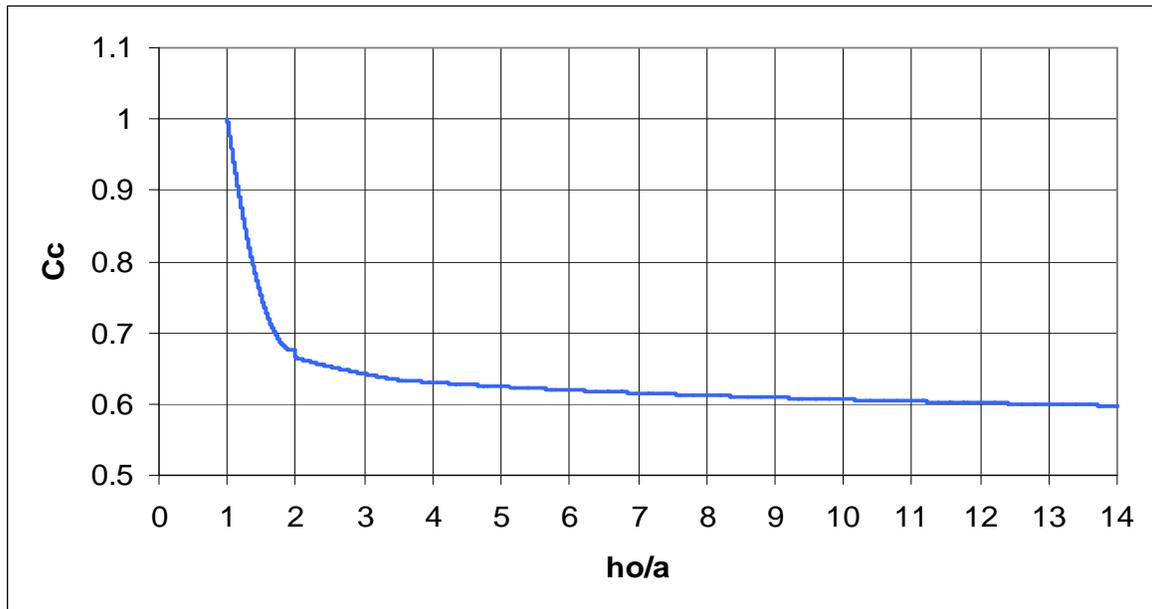
### Ecuación Alternativa

En forma alternativa para estimar el caudal a través de una compuerta plana vertical deslizante se puede usar la siguiente ecuación:

$$Q = C_D ab \sqrt{2gh_0} \quad (3.5)$$

El coeficiente de gasto  $C_D$  puede ser determinado a partir del coeficiente de contracción de acuerdo con la siguiente expresión:

**Figura 3.3 Coeficiente de contracción en compuertas planas**



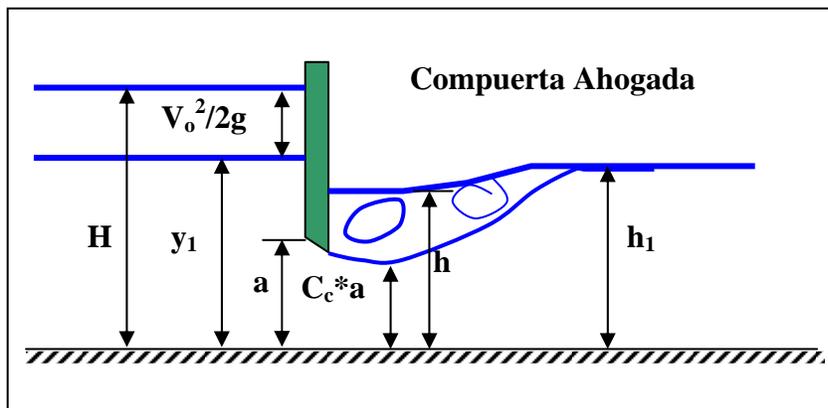
$$C_D = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \frac{a}{h_0}}} \quad (3.6)$$

Esta forma alternativa fue adoptada en el presente estudio para estimar el caudal a través de las compuertas con flujo libre.

**Descarga ahogada**

En la Figura 3.4 se presenta un esquema de la geometría de una compuerta plana rectangular, sin variación de ancho, con descarga ahogada; los niveles y profundidades marcados en este esquema coinciden con los indicados en la Figura 3.3.

**Figura 3.4 Geometría general de una compuerta plana con descarga ahogada**



El caudal a través de una compuerta con descarga ahogada se determina mediante un proceso iterativo utilizando conjuntamente las tres ecuaciones siguientes:

$$\frac{Q^2}{gbC_c a} + \frac{1}{2}b(h')^2 = \frac{Q^2}{gbh_1} + \frac{1}{2}bh_1^2 \quad (3.7)$$

$$Q = C_c ab \sqrt{2gH_0 - h'} \quad (3.8)$$

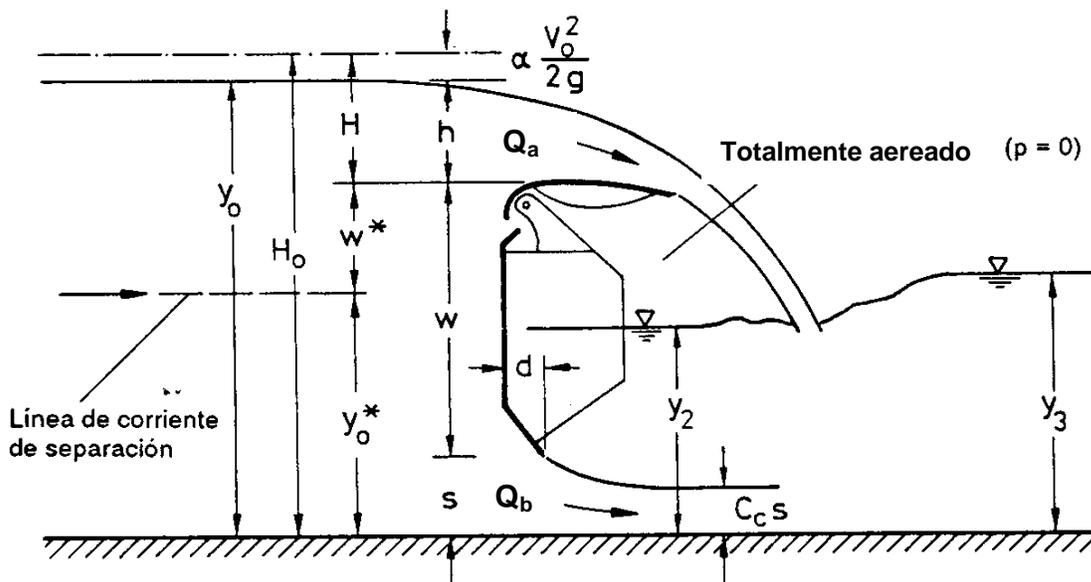
$$H_0 = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} \quad (3.9)$$

### 3.1.2.3 Cálculo del caudal a través del vertedero y la compuerta con escurrimiento simultáneo

Cuando se presente flujo simultáneo por el vertedero (flujo superior) y por la compuerta (flujo inferior) en las estructuras de conexión entre el río Cauca y los humedales el caudal total,  $q$ , corresponderá a la suma de los caudales que escurren a través de la compuerta,  $q_a$ , y el vertedero,  $q_b$ .

En la Figura 3.5 se presenta un esquema de la geometría general de una estructura con flujo superior e inferior simultáneo.

**Figura 3.5 Geometría general de una estructura con flujo superior e inferior simultáneo**



El caudal total, Q, es igual a :

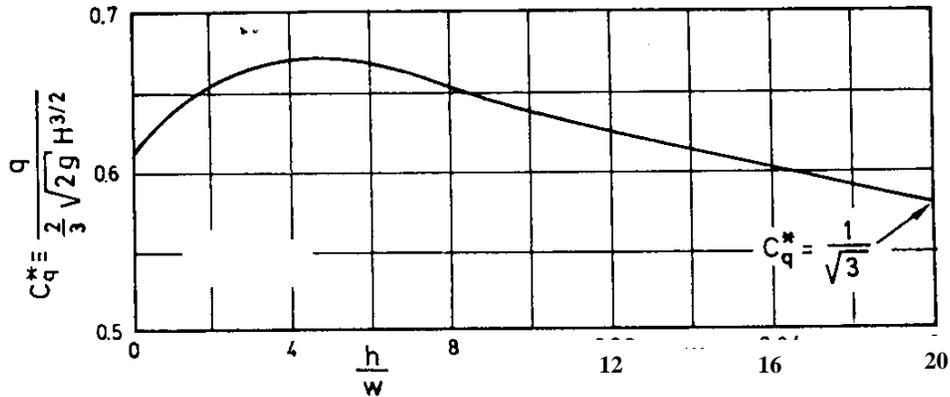
$$Q = Q_a + Q_b \tag{3.10}$$

El caudal a través del vertedero puede ser calculado a través de la siguiente expresión:

$$Q_a = C_q * \frac{2}{3} \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} b_a \tag{3.11}$$

donde  $b_a$  corresponde al ancho del vertedero y el coeficiente de descarga  $C_q^*$  se determina a partir de la Figura 3.6 (Naudascher, 2000):

**Figura 3.6 Coeficiente de descarga  $C_q^*$**



El caudal a través de la compuerta se determina por medio de la siguiente expresión:

$$Q_b = C_c s \sqrt{2g(H_0 - y_2)} b_b \tag{3.12}$$

Donde el coeficiente de contracción  $C_c$  se determina a través de la ecuación 3.4 y  $b_b$  corresponde al ancho de la compuerta

La profundidad  $y_2$  o altura piezométrica aguas abajo de la estructura puede determinarse mediante un proceso iterativo empleando las dos ecuaciones anteriores y la siguiente expresión:

$$\frac{\gamma}{2}(y_2)^2 - \frac{\gamma}{2}(y_3)^3 = \rho \frac{(q_a + q_b)^2}{y_3} - \rho \frac{q_a^2}{C_a H} - \rho \frac{q_b^2}{C_c s} \tag{3.13}$$

donde:

$$q_a = \frac{Q_a}{b_a} \tag{3.14}$$

$$q_b = \frac{Q_b}{b_b} \tag{3.15}$$

### **Procedimiento para el cálculo del caudal**

Para calcular el caudal cuando se presenta escurrimiento simultáneo por la compuerta y el vertedero y se tienen o se conocen los tirantes aguas arriba  $y_0$  aguas abajo,  $y_3$ , de la estructura debe implementarse el siguiente procedimiento:

1. Suponer un caudal  $Q$
2. Calcular la velocidad  $V_0$  ( $V_0 = Q/(y_0 \cdot b)$ )
3. Calcular  $h$  ( $h = y_0 - w - s$ )
4. Calcular  $H$  y  $H_0$  ( $H = h + V_0^2/2g$ ) ( $H_0 = y_0 + V_0^2/2g$ )
5. Calcular  $Q_a$  empleando la ecuación 3.11 (caudal sobre el vertedero)
6. Calcular  $Q_b = Q - Q_a$  (caudal bajo la compuerta)
7. Calcular  $y_2$  a partir de la ecuación (3.12) (profundidad justo aguas abajo de la estructura con base en el caudal a través de la compuerta)
8. Calcular  $y_2$  utilizando la ecuación (3.13) y comparar con el valor obtenido en el punto 7; se debe ajustar el caudal asumido en el punto 1 hasta que estos dos valores sean iguales.

### **3.2 Requerimientos del Estudio de Suelos**

El objetivo principal del estudio de suelos consiste en determinar el tipo de cimentación adecuada para las obras a diseñar, de tal forma que se garantice que el terreno de fundación se comportará adecuadamente con las cargas que la estructura le impone.

Para alcanzar un conocimiento detallado de las características del terreno, el estudio de suelos en cada humedal debe contener, al menos, los siguientes ítems:

1. Sondeos de 6,00 metros de profundidad o hasta rechazo. Se considera que se ha llegado a la condición de rechazo cuando el ensayo de penetración estándar indica que se requieren más de 50 golpes por pie. En estos sondeos se deben tomar muestras representativas del subsuelo, describir la estratigrafía encontrada, medir el nivel freático y realizar en el sitio el ensayo de penetración estándar.
2. Pruebas de laboratorio. A las muestras del subsuelo se les debe realizar los siguientes ensayos en el laboratorio: humedad natural, límites de Atterberg, gradación, resistencia a la compresión confinada y peso unitario. Adicionalmente, las muestras deben ser clasificadas de acuerdo con el Sistema Unificado de Suelos (USCS).
3. Determinación de las propiedades del terreno de fundación. A partir de la información obtenida a través de los trabajos de campo y los ensayos de laboratorio, se deben establecer las características más importantes del terreno tales como

potencial de licuación, capacidad portante, asentamientos estimados para las estructuras proyectadas, etc.

- 4 Recomendaciones de fundación. Se debe establecer la cimentación más adecuada para la estructura proyectada y definir parámetros para su diseño y construcción. Adicionalmente deben establecerse parámetros sísmicos de diseño y recomendaciones constructivas.

### **3.3 Requerimientos del Diseño Estructural**

El objetivo principal del diseño estructural es establecer las dimensiones y el reforzamiento adecuados de tal forma que se garantice que la obra no fallará al estar sometida a las presiones y esfuerzos de diseño.

Para garantizar que la estructura se comportará de manera adecuada durante su vida útil, el diseño estructural debe considerar, al menos, los siguientes parámetros:

- 1 Determinación de cargas de servicio. Se deben establecer las cargas vivas y las cargas muertas que actuarán sobre la estructura, así como las cargas debidas a eventos sísmicos.
- 2 Determinación de cargas de diseño. A partir de las cargas de servicio y utilizando los factores de mayoración adecuados, deben establecerse las cargas de diseño.
- 3 Determinación de esfuerzos actuantes sobre el terreno de fundación y sobre la estructura. A partir de las cargas de diseño, deben definirse los esfuerzos que actuarán sobre el suelo y sobre la estructura; deberán considerar las presiones de contacto suelo-estructura, los esfuerzos cortantes, de compresión, de flexión y los demás que a juicio del diseñador deban ser incluidos.
- 4 Determinación de las dimensiones y el reforzamiento de la estructura. A partir de los esfuerzos actuantes y las propiedades de los materiales a utilizar, deben definirse las dimensiones de la estructura y las cuantías de acero necesarias con el fin de garantizar la estabilidad de la obra.
- 5 Definición de detalles constructivos. Los planos de construcción deben contener todos los detalles constructivos requeridos para que la construcción de la obra proyectada pueda realizarse sin contratiempos ni inconvenientes.

## **4. DISEÑO HIDRAULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL LA GUINEA**

### **4.1 Localización**

El humedal La Guinea se localiza en el corregimiento de Robles – municipio de Jamundí. El canal de conexión entre el humedal y el río Cauca se encuentra en la abscisa K 34+580 aproximadamente. En años anteriores en este canal operó una compuerta plana que, de acuerdo con el testimonio de los habitantes del sector, se comportó de una manera adecuada; sin embargo, en la actualidad la compuerta no existe y sólo se encuentra en el canal la obra de concreto que la albergaba.

La estructura hidráulica que se diseñará estará ubicada a unos 220 m de la confluencia con el río Cauca, aproximadamente a 10 m aguas arriba de la compuerta anterior.

### **4.2 Análisis de Niveles del Río Cauca**

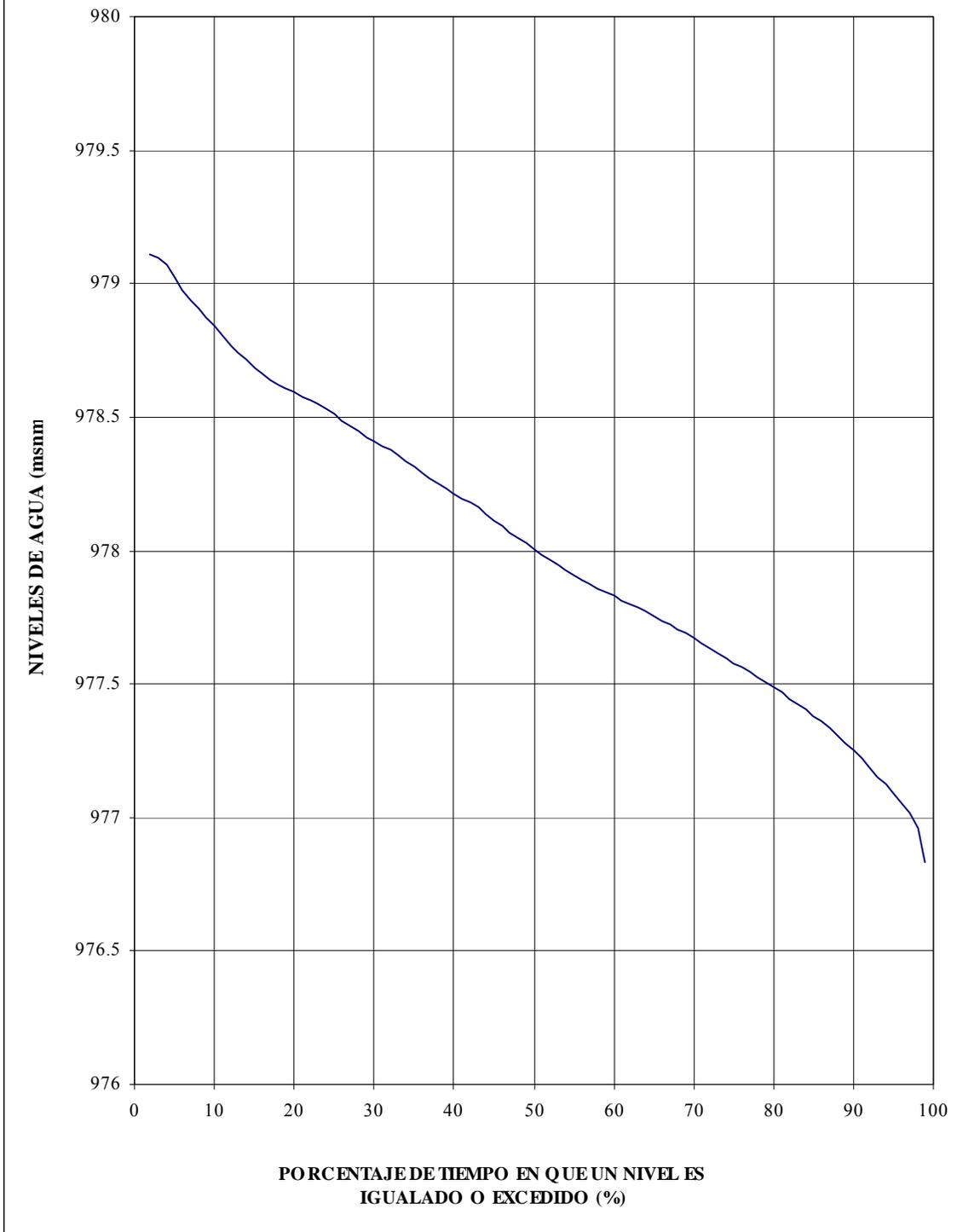
Utilizando el modelo matemático hidrodinámico del río Cauca implementado en desarrollo del proyecto PMC (CVC – Universidad del Valle, 2007) y actualizado en el presente estudio, se determinaron los niveles del río Cauca frente al canal de conexión (entre el humedal y el río) en el período 1985 – 2007, es decir, después de la entrada en operación de la represa de Salvajina.

El modelo hidrodinámico del río Cauca fue desarrollado utilizando el software MIKE 11 y se construyó con base en las secciones transversales del río Cauca medidas en el año 2000 y secciones de los ríos tributarios levantadas en el año 2003. La información relacionada con esta modelación puede ser consultada en el Volumen XIV de la Fase III del Proyecto de Modelación del río Cauca. Teniendo en cuenta la movilidad del río Cauca en su valle alto geográfico, en el año 2006 la CVC y la Universidad del Valle realizaron una nueva batimetría del río Cauca en el tramo Suárez – Hormiguero. En desarrollo del presente estudio se consideró adecuado implementar la nueva batimetría del año 2006 para actualizar el modelo.

Se modeló el período comprendido desde la entrada en operación del embalse de Salvajina hasta el año 2007 utilizando los mismos coeficientes de rugosidad encontrados en el proyecto PMC; los resultados obtenidos fueron satisfactorios y se utilizaron para analizar los niveles del río Cauca frente al canal de conexión con el humedal en el período modelado.

Utilizando los resultados de la modelación se construyó la curva de duración de niveles del río Cauca frente al canal de conexión, la cual se presenta en la Figura 4.1. Los niveles del río Cauca en este sitio varían entre 976.89 msnm (permanencia del 99 %) y 979.14 msnm (permanencia del 1 %).

**FIGURA 4.1 CURVA DE DURACION DE NIVELES DEL RIO CAUCA  
FRENTE AL HUMEDAL GUINEA**



### **4.3 Dimensionamiento de la Estructura**

Para definir las dimensiones de la estructura hidráulica se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Dimensiones de la sección transversal del canal de conexión.
- Niveles del río Cauca frente al canal de conexión.
- Caudales de intercambio entre la madreveja y el río Cauca.

Dado que la sección transversal en la cual se ubicará la obra hidráulica tiene un ancho cercano a los 2.00 m, se adoptó un ancho de la pantalla de 2.00 m. Para la selección de la cota de la cresta del vertedero se procuró seleccionar un nivel tal que permitiera mantener una profundidad de agua de al menos 1.0 metro en la mayor parte del humedal y un intercambio de caudales frecuente entre el río y el humedal; se seleccionó el nivel 978,40 msnsm, el cual, de acuerdo con la curva de duración de caudales (ver Figura 4.1) tiene una permanencia del 30 % en el río Cauca. El ancho y la altura del vertedero fueron definidos iguales a 0,70 m y 0,50 m, respectivamente; a la compuerta se le definieron un ancho y una abertura iguales a 0,80 m. En la Figura 4.2 se presenta un esquema de las dimensiones definidas para la estructura hidráulica.

### **4.4 Cálculo de caudales**

Se determinaron los caudales que fluirán a través de las estructuras en los tres escenarios posibles: (i) flujo sólo sobre el vertedero, (ii) flujo sólo a través de la compuerta y (iii) flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta.

#### **4.4.1 Cálculo de caudales sobre el vertedero**

El caudal que puede pasar sobre el vertedero para diferentes alturas o cargas sobre el mismo se calculó por medio de la ecuación 3.1. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 4.1.

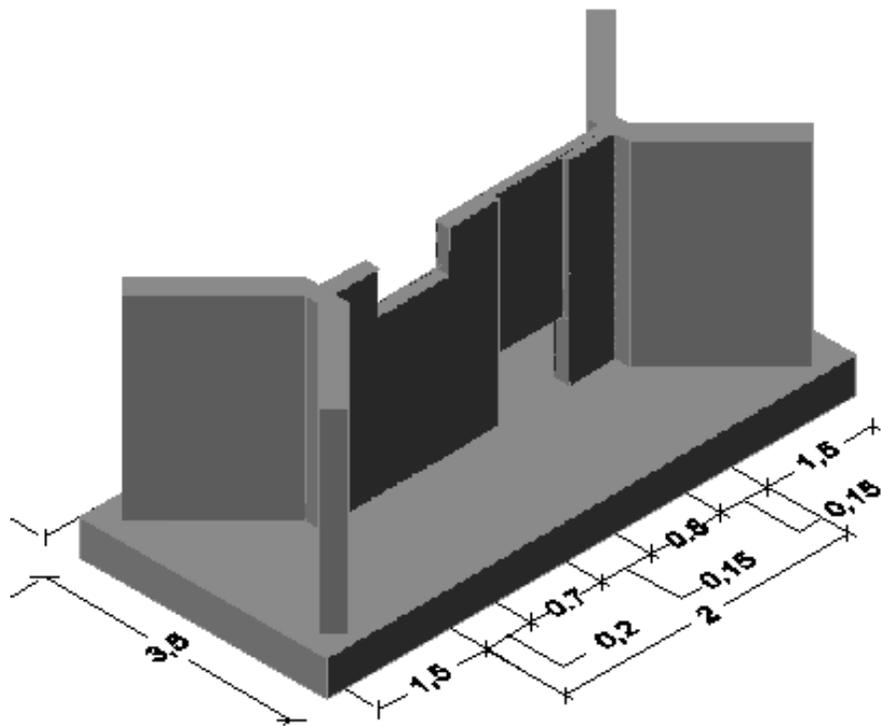
#### **4.4.2 Cálculo de Caudales a través de la Compuerta**

El caudal que fluye a través de la compuerta fue calculado utilizando la ecuación 3.5 para el flujo con descarga libre y las ecuaciones 3.7 a 3.9 para el flujo con descarga ahogada. Los resultados obtenidos para diferentes profundidades aguas arriba de la estructura y considerando la compuerta totalmente abierta se presentan en el Cuadro 4.2.

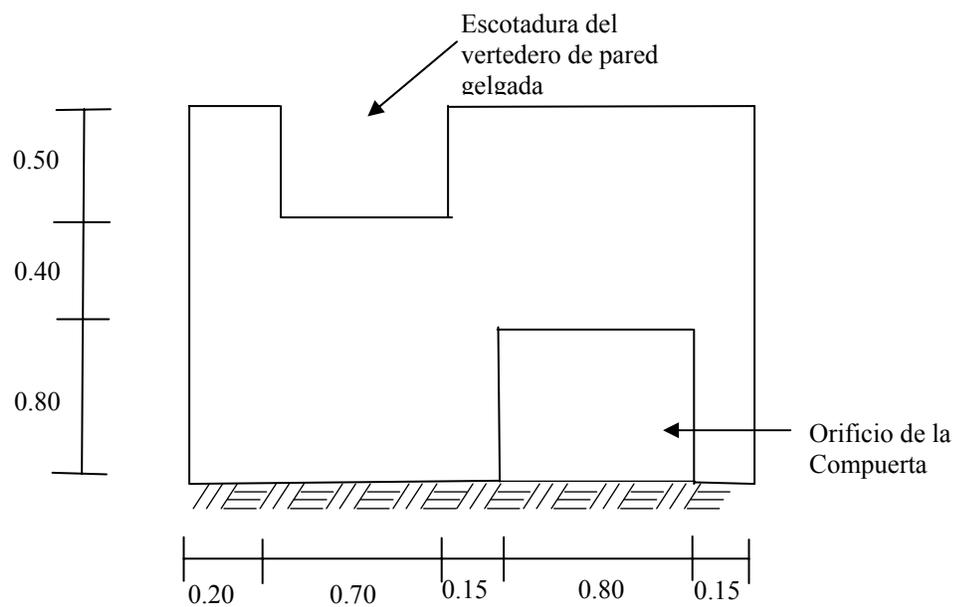
#### **4.4.3 Cálculo de caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero**

El cálculo de los caudales para diferentes tirantes o profundidades aguas arriba y considerando la compuerta totalmente abierta cuando se presenta flujo superior e inferior en la estructura fue realizado utilizando las ecuaciones 3.10 a 3.13. Los valores obtenidos se presentan en el Cuadro 4.3.

**Figura 4.2 Dimensiones de la Estructura Hidráulica en el Humedal La Guinea**



**a. Isometría de la Estructura**



**b. Vista Frontal de la Pantalla**

Nota: dimensiones en metros

**Cuadro 4.1 Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal La Guinea**

| <b>Altura ó carga sobre el vertedero <math>h_1</math> (m)</b> | <b>Coefficiente efectivo de descarga <math>C_e</math></b> | <b>Caudal <math>Q</math> (l/s)</b> |
|---|---|------------------------------------|
| 0,05  | 0,5889  | 13,60                              |
| 0,10  | 0,5889  | 38,47                              |
| 0,15  | 0,5888  | 70,67                              |
| 0,20  | 0,5887  | 108,79                             |
| 0,25  | 0,5886  | 152,01                             |
| 0,30  | 0,5886  | 199,80                             |
| 0,35  | 0,5885  | 251,75                             |
| 0,40  | 0,5884  | 307,54                             |
| 0,45  | 0,5883  | 366,92                             |
| 0,50  | 0,5883  | 429,69                             |

#### **4.5 Estudio de Suelos**

En el sitio en el que se proyecta construir la estructura hidráulica se realizó un sondeo hasta encontrar la condición de rechazo a los 5,10 m de profundidad, se realizó el ensayo de penetración estándar, se tomaron muestras representativas del subsuelo y se midió el nivel freático; a las muestras del subsuelo se les realizaron varias pruebas de laboratorio. Los resultados derivados de los trabajos de campo y laboratorio se presentan en el Anexo 1. Las características y propiedades de los suelos encontrados en el sitio de la estructura hidráulica se presentan a continuación.

##### **4.5.1 Resultados de la Investigación Geotécnica**

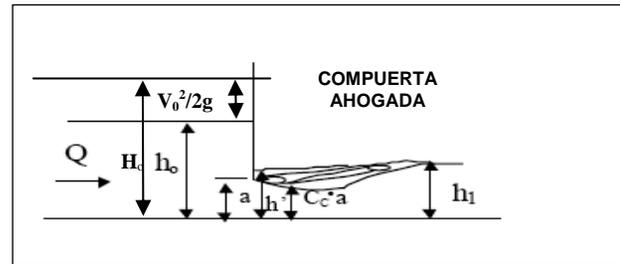
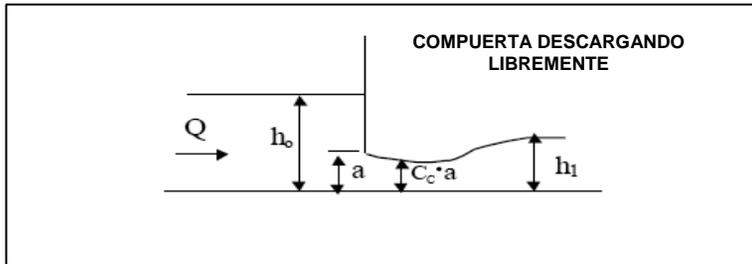
El material encontrado en el sondeo corresponde a limos arcillosos con arena de gradación fina, de color café hasta una profundidad de 1,70 m, continuando luego con limos arcillosos de color gris que se extienden hasta profundidad de 5,10 m. Estos suelos son de características cohesivas, de consistencia blanda a muy blanda, de mediana a alta plasticidad, del tipo MH y MH-ML de la Clasificación Unificada (ver Anexo 1), saturados, con contenidos de humedad muy por encima de su límite plástico, relativamente cercanos a su límite líquido (N: 1 a 6 golpes/pie).

Por debajo de los 5,10 m de profundidad aparecen gravas arenosas limosas, de gradación mediana a fina, de color gris densas (N > 50 golpes/pie). Presentan una fracción pasa tamiz No. 200 del 13,5%, con una fracción de limo de baja plasticidad. Su densidad relativa ( $D_r$ ) se estima superior al 80%, con un ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) del orden de los 40°.

El nivel freático aparece a los 1,40 mts de profundidad.

Cuadro 4.2. Cálculo del Caudal a través de la Compuerta

| Profundidad aguas arriba de la compuerta (m) | Profundidad aguas arriba de la compuerta $h_o$ / Abertura de la compuerta a $h_o/a$ | Flujo con Descarga Libre          |                             |                        | Flujo con Descarga Ahogada                        |                                       |  |  |  |   |
|--|---|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|---|
|  |   | Coefficiente de contracción $C_c$ | Coefficiente de gasto $C_D$ | Caudal $Q$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la compuerta $h_1$ (m) | Caudal asumido $Q_{asum}$ ( $m^3/s$ ) | Altura en la sección de la vena contraída $h'$ (m) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_o$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_o$ (m) | Caudal calculado $Q_{calc}$ ( $m^3/s$ ) |
| 0,85   | 1.06  | 0,96                              | 0,70                        | 1,82                   | 0,80  | 0,67                                  | 0,80   | 0,33   | 0,86   | 0,67                                    |
| 0,90   | 1.13  | 0,92                              | 0,68                        | 1,84                   | 0,80  | 0,93                                  | 0,78   | 0,42   | 0,91   | 0,93                                    |
| 0,95   | 1.19  | 0,89                              | 0,67                        | 1,85                   | 0,80  | 1,13                                  | 0,76   | 0,47   | 0,96   | 1,13                                    |
| 1,00   | 1.25  | 0,85                              | 0,66                        | 1,86                   | 0,80  | 1,30                                  | 0,72   | 0,51   | 1,01   | 1,30                                    |
| 1,05   | 1.31  | 0,82                              | 0,65                        | 1,87                   | 0,80  | 1,45                                  | 0,68   | 0,53   | 1,06   | 1,45                                    |
| 1,10   | 1.38  | 0,80                              | 0,63                        | 1,88                   | 0,80  | 1,60                                  | 0,61   | 0,55   | 1,12   | 1,59                                    |
| 1,15   | 1.44  | 0,77                              | 0,62                        | 1,89                   | 1,00  | 1,25                                  | 0,83   | 0,40   | 1,16   | 1,25                                    |
| 1,20   | 1.50  | 0,75                              | 0,61                        | 1,90                   | 1,00  | 1,45                                  | 0,74   | 0,44   | 1,21   | 1,45                                    |
| 1,25   | 1.56  | 0,73                              | 0,60                        | 1,91                   | 1,00  | 1,70                                  | 0,59   | 0,48   | 1,26   | 1,70                                    |
| 1,30   | 1.63  | 0,71                              | 0,60                        | 1,92                   | 1,10  | 1,40                                  | 0,83   | 0,38   | 1,31   | 1,40                                    |
| 1,35   | 1.69  | 0,70                              | 0,59                        | 1,94                   | 1,10  | 1,92                                  | 0,43   | 0,49   | 1,36   | 1,92                                    |
| 1,40   | 1.75  | 0,69                              | 0,58                        | 1,96                   | 1,20  | 2,10                                  | 0,26   | 0,50   | 1,41   | 2,10                                    |
| 1,70   | 2.13  | 0,69                              | 0,60                        | 2,20                   | 1,50  | 1,20                                  | 1,31   | 0,21   | 1,70   | 1,22                                    |



Cuadro 4.3. Cálculo del Caudal con Flujo Simultáneo a través del Vertedero y la Compuerta

| Profundidad aguas arriba de la estructura (m) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_3$ | Caudal Asumido $Q_{asum}$ ( $m^3/s$ ) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_o$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_o$ (m) | Energía sobre el Vertedero $H$ (m) | Carga sobre el vertedero/ Altura de la estructura sin flujo $h/W$ | Coeficiente de descarga $C_q^*$ | Caudal sobre el vertedero $Q_a$ ( $m^3/s$ ) | Caudal a través de la compuerta $Q_b$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_2$ |                                    |
|---|--|---------------------------------------|--|--|------------------------------------|---|---------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
|   |  |                                       |  |  |                                    |   |                                 |   |   | calculada con la ecuación 3.12 (m)             | calculada con la ecuación 3.13 (m) |
| 1,25  | 1,00   | 1,62                                  | 0,46   | 1,26   | 0,06                               | 0,08  | 0,62                            | 0,02  | 1,60  | 0,66   | 0,66                               |
| 1,30  | 1,00   | 1,95                                  | 0,52   | 1,31   | 0,11                               | 0,17  | 0,62                            | 0,05  | 1,90  | 0,43   | 0,43                               |
| 1,35  | 1,10   | 2,2                                   | 0,56   | 1,37   | 0,17                               | 0,25  | 0,62                            | 0,09  | 2,11  | 0,23   | 0,23                               |
| 1,40  | 1,15   | 2,29                                  | 0,55   | 1,42   | 0,22                               | 0,33  | 0,62                            | 0,13  | 2,16  | 0,20   | 0,20                               |
| 1,45  | 1,30   | 1,21                                  | 0,27   | 1,45   | 0,25                               | 0,42  | 0,62                            | 0,16  | 1,05  | 1,16   | 1,16                               |
| 1,50  | 1,30   | 1,44                                  | 0,31   | 1,50   | 0,30                               | 0,50  | 0,62                            | 0,22  | 1,22  | 1,10   | 1,10                               |
| 1,55  | 1,30   | 1,6                                   | 0,33   | 1,56   | 0,36                               | 0,58  | 0,62                            | 0,27  | 1,33  | 1,07   | 1,07                               |
| 1,60  | 1,30   | 1,8                                   | 0,35   | 1,61   | 0,41                               | 0,67  | 0,62                            | 0,33  | 1,47  | 1,02   | 1,02                               |
| 1,65  | 1,30   | 1,97                                  | 0,37   | 1,66   | 0,46                               | 0,75  | 0,62                            | 0,40  | 1,57  | 0,99   | 0,98                               |
| 1,70  | 1,30   | 2,15                                  | 0,38   | 1,71   | 0,51                               | 0,83  | 0,62                            | 0,46  | 1,69  | 0,95   | 0,94                               |

## Análisis de Resultados

En el sitio en el que se realizó el sondeo predominan gruesos depósitos de suelos de origen sedimentario reciente, blandos a saturados, con un nivel freático relativamente superficial, que en lo que respecta a los suelos superficiales están constituidos por limos desde baja hasta mediana plasticidad, los cuales suprayacen a depósitos granulares que pueden ser arenas o gravas, de compacidad baja a media en lo que a las arenas se refiere, y densas en relación con las gravas. La existencia de suelos blandos a muy blandos superficiales es razonable si se tiene en cuenta que el sitio investigado corresponde a una madreveja en la que predominan suelos saturados.

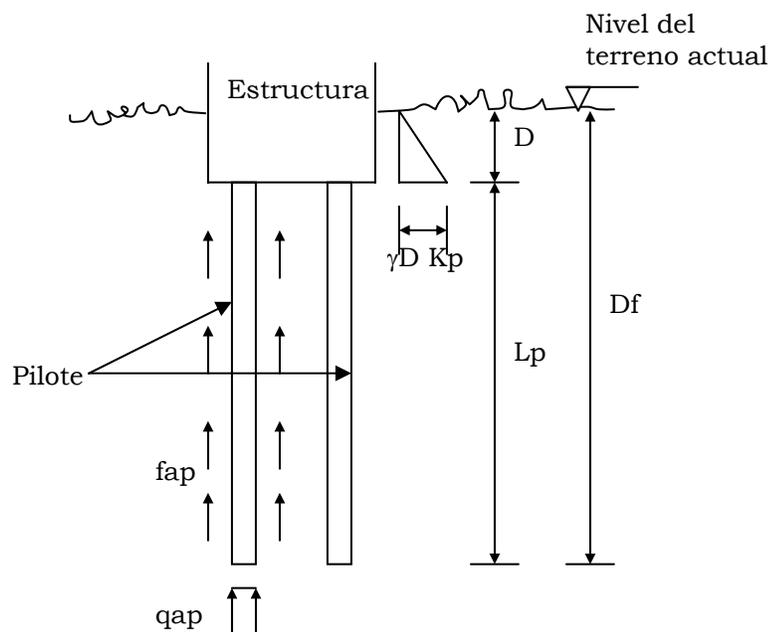
### 4.5.2 Recomendaciones para la fundación de la estructura

Teniendo en cuenta las características blandas a muy blandas de los limos detectados la fundación de tipo superficial para la estructura hidráulica a base de zapatas convencionales no es la más indicada, debido a que la capacidad portante de los suelos superficiales se estima del orden de los 0,20 a 0,30 Kg/cm<sup>2</sup>, existiendo el riesgo grande de asentamientos por consolidación.

Se recomienda por lo tanto el empleo de fundaciones profundas, conformadas por pilotes hincados o pre-excavados, llevadas hasta los depósitos de gravas densas. La profundidad de los pilotes es del orden de los 5,00 mts.

Para efectos del dimensionamiento de los pilotes se pueden emplear los siguientes parámetros del suelo (Figura 4.3):

**Figura 4.3 Esquema de la Fundación Recomendada**



En donde:

D : Profundidad de apoyo de la estructura.

L<sub>p</sub> : Longitud del pilote.

D<sub>f</sub> : Profundidad de fundación medida a partir del nivel del terreno. Igual a 5,00 m

fap = Capacidad portante admisible por fricción. Igual a 0,10 kg/cm<sup>2</sup> con un factor de seguridad de 2,0

qap = Capacidad portante admisible en la punta. Igual a 4,0 kg/cm<sup>2</sup> con un factor de seguridad de 3,0

K<sub>H</sub> = Módulo de reacción del suelo 1,0 Kg/cm<sup>2</sup>/cm

La resistencia neta por pilote o pila se determina de la siguiente manera:

$$Q_n = Q_p + Q_f - W$$

$$Q_{nT} = Q_f + W$$

En donde:

Q<sub>n</sub> : Resistencia neta a compresión.

Q<sub>nT</sub>: Resistencia neta a tracción.

Q<sub>p</sub>: Resistencia en la punta.

Q<sub>f</sub>: Resistencia por fricción.

W: Peso del caisson, pila o pilote.

Los valores anteriores se estiman en función de las dimensiones del pilote, pila o caisson, y de los valores de capacidad portante recomendados.

Para efectos de compensar las fuerzas horizontales que puedan actuar sobre la estructura se puede emplear la reacción horizontal de los pilotes estimada en función del módulo de reacción horizontal del suelo (K<sub>H</sub>), además de la resistencia pasiva del suelo proporcionada por la profundidad de embebimiento o apoyo de la estructura (D), tal como se muestra en la Figura 4.3. El coeficiente de presión pasiva (K<sub>p</sub>) puede tomarse como 2,0 y el peso unitario del suelo (γ) como 1,8 ton/m<sup>3</sup>. Si se desea estimar la presión activa, el coeficiente (K<sub>a</sub>) es 0,50.

Para efectos de evaluar las fuerzas sísmicas que actúan sobre las estructuras proyectadas se puede emplear el Espectro Elástico de Aceleraciones dado por la Norma NSR-98, teniendo en cuenta que el tipo de perfil del suelo en el sitio se asemeja al S3 de la Norma, y que, por lo tanto, el Coeficiente de Sitio (S) es de 1,5. Debe tenerse en cuenta que la obra se localiza en una zona de amenaza sísmica alta, siendo por lo tanto el Coeficiente de Aceleración (A<sub>a</sub>) pico efectivo igual a 0,25.

Si se emplean pilotes hincados estos deben ser prefabricados, llevados hasta la profundidad mínima mencionada. En el caso de pilotes barrenados o pre-excavados estos se pueden realizar usando equipos mecánicos a rotación, mediante Augers Helicoidales para las excavaciones en limos y arcillas, y Bucket Augers para las excavaciones en arenas y gravas, utilizando la técnica de excavación con lodo bentonítico o polímeros para evitar derrumbes. El vaciado se hará bajo agua, mediante el Sistema “Tremie”, es decir usando tubo embudo o “Trompa de Elefante”. El concreto empleado en el vaciado debe tener un slump entre 6 y 7 pulg, para facilitar su colocación a través de la Trompa, y el llenado del pilote, caisson o pila. El lodo bentonítico debe ser dosificado por el Contratista para garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación, con base en su mayor experiencia. Sin embargo, se estima que el lodo bentonítico debe tener una viscosidad Marsh mínima de 48 a 55 seg, una densidad del orden de los 1025 grs/cm<sup>3</sup>, un contenido de arena menor al 1% y un espesor del “Cake” menor a 3.0 mm.

Técnicas de excavación manual, como es la excavación mediante anillos vaciados en el sitio no son viables, por la consistencia blanda a muy blanda del subsuelo, y la necesidad de acometer excavaciones en arena bajo el nivel freático, que si se acometen por este sistema pueden presentar serias dificultades constructivas por los derrumbes que se pueden originar, lo que termina por deteriorar el suelo de fundación y ocasionar el “descuelgue” de los anillos.

#### 4.6 Diseño Estructural

El análisis estructural y la determinación de las cuantías de acero de refuerzo necesarias para garantizar la estabilidad de la obra fueron realizados por medio del software SISMICAD versión 14, el cual es un programa especializado de elementos finitos para el análisis, diseño, dibujo y determinación de cantidades de obra de estructuras civiles.

Los parámetros de diseño introducidos al modelo fueron los siguientes:

|  |   |
|--|---|
| Método de cálculo:   | NSR – 98 Estado límite – AISC LRFD                  |
| Datos Sísmicos:  | NSR – 98 Método de la fuerza horizontal equivalente |
| Coefficiente de amenaza sísmica Tabla A.2-1                    | $A_a = 0.25$  |
| Coefficiente de sitio Tabla A.2-3                              | $S = 1.5$   |
| Coefficiente de Importancia Tabla A.2-4                        | $I = 1$   |
| Capacidad de disipación de energía $R = f_{ia} * f_{ib} * R_o$ | $= 4$   |
| Altura media desde la base para calcular $T_a$ (A.4-2)         | $= 270$   |
| $C_t$ para calcular $T_a$ (A.4-2)                              | $= 0.08$  |

Datos del suelo: Se utilizaron los datos obtenidos del estudio de suelos realizado para el diseño de esta estructura (ver ítem 4.5).

Los resultados arrojados por el modelo se presentan en el Anexo 2. En el Plano 1 se presenta el diseño estructural finalmente obtenido para esta obra y en el Plano 5 los detalles constructivos de la compuerta. En el Cuadro 4.4 se presenta el presupuesto para la construcción de la estructura.

Cuadro 4.4 Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal La Guinea

| DESCRIPCION  | UNIDAD         | CANTIDAD | VR. UNIT.    | VR. TOTAL (\$)       |
|--|----------------|----------|--------------|----------------------|
| <b>PRELIMINARES</b>  |                |          |              |                      |
| Localización y Replanteo   | Gl             |          |              | 500 000.00           |
| Manejo del agua durante la construcción (incluye bombeos)            | Gl             |          |              | 2 000 000.00         |
| <b>EXCAVACIONES</b>  |                |          |              |                      |
| Zapata y aletas  | m <sup>3</sup> | 17       |              | 0.00                 |
| <b>RELLENOS</b>  |                |          |              |                      |
| Con material del sitio (detrás de las aletas)                        | m <sup>3</sup> | 4.4      | 20 000.00    | 87 400.00            |
| <b>CONCRETO F`c = 350 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                 |                |          |              |                      |
| Para pilotes   | m <sup>3</sup> | 2.5      | 550 000.00   | 1 375 000.00         |
| <b>HINCADO DE PILOTES</b>  |                |          |              |                      |
| <b>CONCRETO F`c = 210 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                 |                |          |              |                      |
| Para zapata  | m <sup>3</sup> | 4.5      | 350 000.00   | 1 575 000.00         |
| Muro y aletas  | m <sup>3</sup> | 3.5      | 450 000.00   | 1 575 000.00         |
| Solado de limpieza espesor = 3"                                      | m <sup>3</sup> | 1        | 200 000.00   | 200 000.00           |
| <b>ACERO DE REFUERZO Fy= 4200 Kg/cm2 (incluye corte y flejado)</b>   |                |          |              |                      |
| Diámetro 5/8"  | Kg             | 475      | 2 400.00     | 1 140 000.00         |
| Diámetro 1/2"  | Kg             | 285      | 2 400.00     | 684 000.00           |
| Diámetro 3/8"  | Kg             | 115      | 2 400.00     | 276 000.00           |
| <b>COMPUERTA Y ELEMENTOS VARIOS</b>                                  |                |          |              |                      |
| Alambre negro No. 18   | Kg             | 30       | 2 500.00     | 75 000.00            |
| Compuerta metálica deslizante/dimensiones: ancho=0,8 m, altura=0,8 m | Un             | 1        | 3 000 000.00 | 3 000 000.00         |
| <b>COSTO DIRECTO (materiales, mano de obra y equipos)</b>            |                |          |              | 17 287 400.00        |
| <b>COSTOS INDIRECTOS - A.U.I. ( 35% del costo directo)</b>           |                |          |              | 6 050 590.00         |
| <b>COSTO TOTAL</b>   |                |          |              | <b>23 337 990.00</b> |

## **5. DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL GUARINÓ**

### **5.1 Localización**

El humedal Guarinó está ubicado en el corregimiento de Robles del municipio de Jamundí. El canal de conexión entre el humedal y el río Cauca desemboca aproximadamente en la abscisa K 39 +650. La estructura hidráulica que se diseñará estará ubicada a unos 20 m de la confluencia con el río Cauca.

### **5.2 Análisis de Niveles del Río Cauca**

Utilizando el modelo matemático hidrodinámico del río Cauca implementado en desarrollo del proyecto PMC (CVC – Universidad del Valle, 2007) y actualizado en el presente estudio, se determinaron los niveles del río Cauca frente al canal de conexión (entre el humedal y el río) en el período 1985 – 2007, es decir, después de la entrada en operación de la represa de Salvajina.

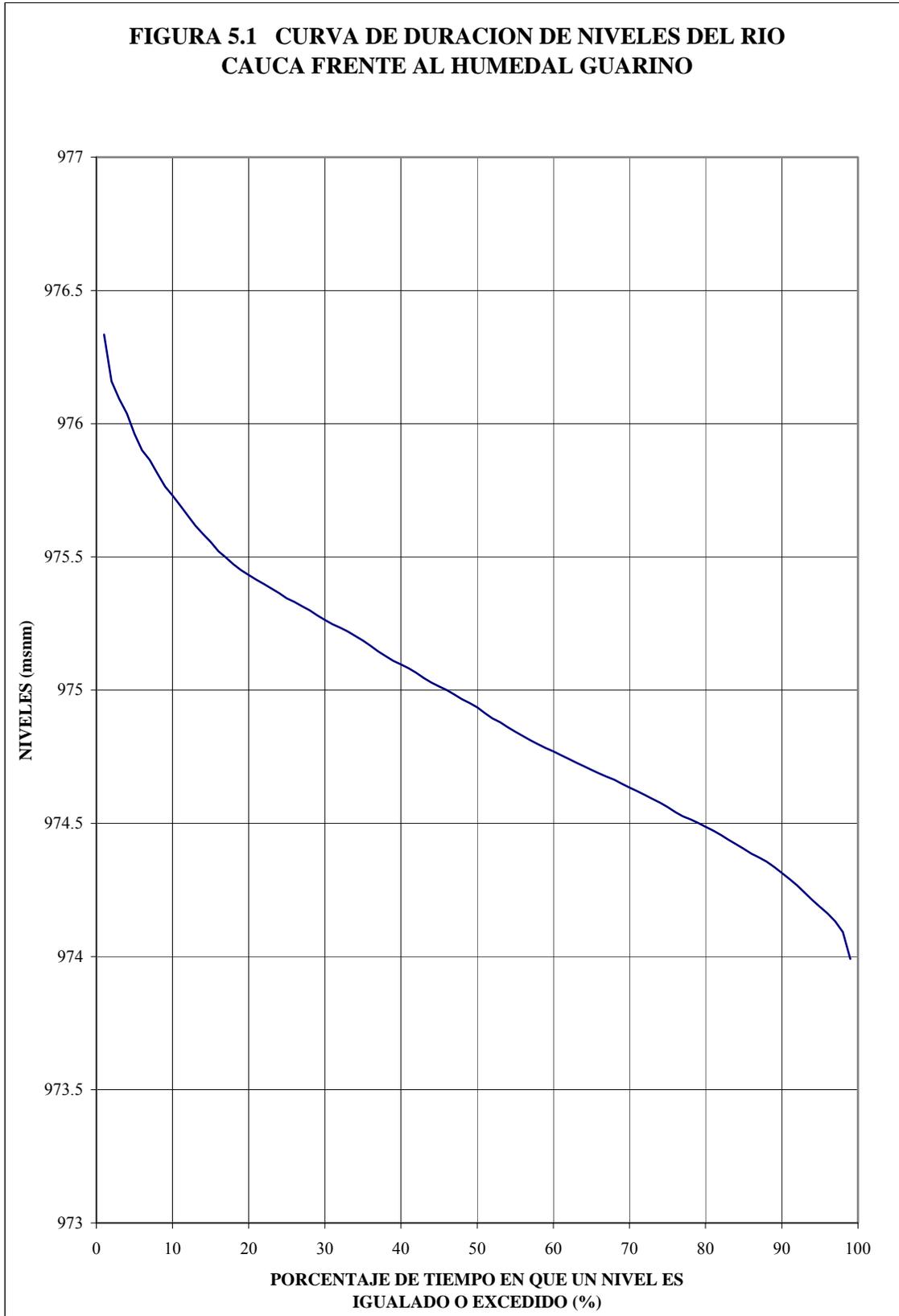
A partir de los resultados de la modelación se construyó la curva de duración de niveles del río Cauca frente al canal de conexión, la cual se presenta en la Figura 5.1. Los niveles del río Cauca en este sitio varían entre 973,98 msnm (permanencia del 99 %) y 976.33 msnm (permanencia del 1 %).

### **5.3 Dimensionamiento de la Estructura**

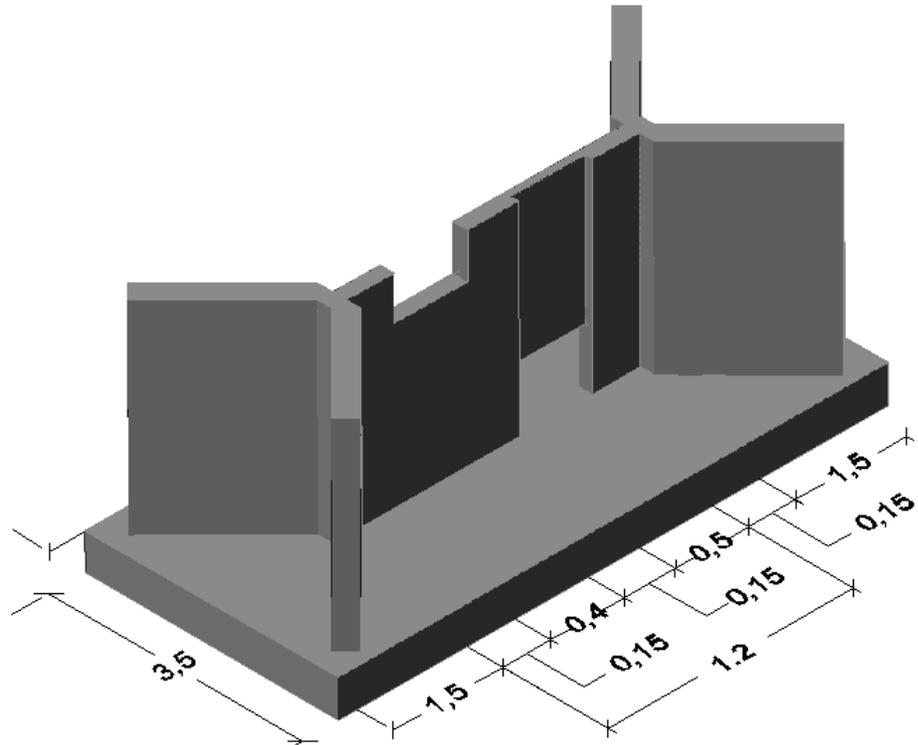
Para definir las dimensiones de la estructura hidráulica se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Dimensiones de la sección transversal del canal de conexión.
- Niveles del río Cauca frente al canal de conexión.
- Caudales de intercambio entre la madre vieja y el río Cauca.

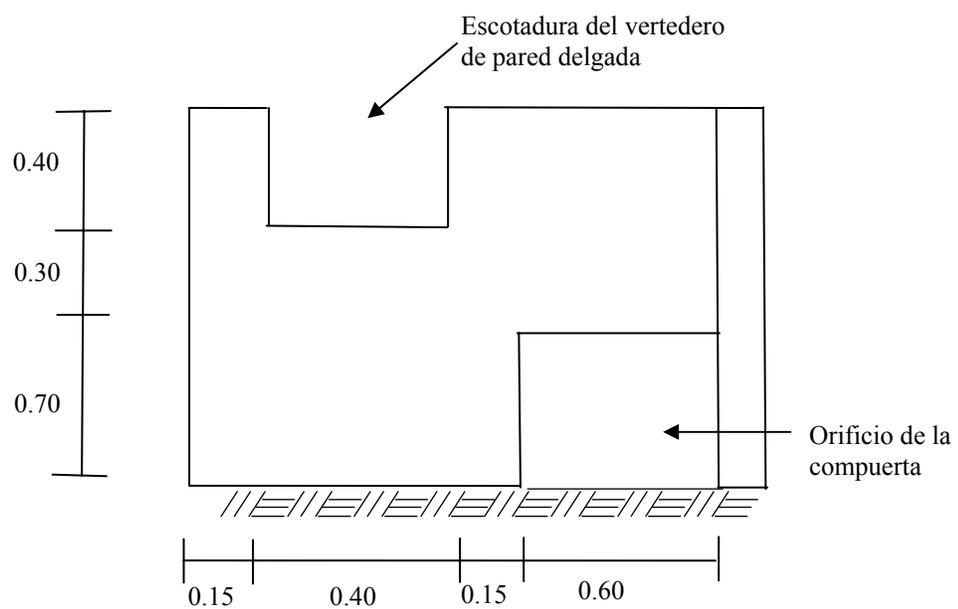
Dado que la sección transversal en la cual se ubicará la obra hidráulica tiene un ancho de aproximadamente 1,00 m, se adoptó un ancho de la pantalla de 1,20 m. Para la selección de la cota de la cresta del vertedero se procuró seleccionar un nivel tal que permitiera mantener una profundidad de agua de al menos 1,0 metro en la mayor parte del humedal y un intercambio frecuente entre el río y el humedal; se seleccionó el nivel 974,50 msnm, el cual, de acuerdo con la curva de duración de caudales (ver Figura 5.1) tiene una permanencia del 78 % en el río Cauca. El ancho y la altura del vertedero fueron definidos iguales a 0,40 m; a la compuerta se le definieron un ancho y una abertura de 0,60m y 0,70 m, respectivamente. En la Figura 5.2 se presenta un esquema de las dimensiones definidas para la estructura hidráulica.



**Figura 5.2 Dimensiones de la Estructura Hidráulica en el humedal Guarinó**



**a. Isometría de la Estructura**



**b. Vista Frontal de la Pantalla**

Nota: dimensiones en metros

## 5.4 Cálculo de Caudales

Se determinaron los caudales que fluirán a través de las estructuras en los tres escenarios posibles: (i) flujo sólo sobre el vertedero, (ii) flujo sólo a través de la compuerta y (iii) flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta.

### 5.4.1 Cálculo de Caudales sobre el Vertedero

El caudal que puede pasar sobre el vertedero para diferentes alturas o cargas sobre el mismo se calculó por medio de la ecuación 3.1. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 5.1.

**Cuadro 5.1 Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal Guarinó**

| Altura o carga sobre el vertedero, $h_1$ (m) | Coefficiente efectivo de descarga, $C_e$ | Caudal $Q$ (l/s) |
|--|--|------------------|
| 0,05   | 0,5901                                   | 7,79             |
| 0,10   | 0,5902                                   | 22,03            |
| 0,15   | 0,5903                                   | 40,49            |
| 0,20   | 0,5904                                   | 62,34            |
| 0,25   | 0,5905                                   | 87,14            |
| 0,30   | 0,5906                                   | 114,57           |
| 0,35   | 0,5907                                   | 144,40           |
| 0,40   | 0,5908                                   | 176,45           |

### 5.4.2 Cálculo de Caudales a través de la Compuerta

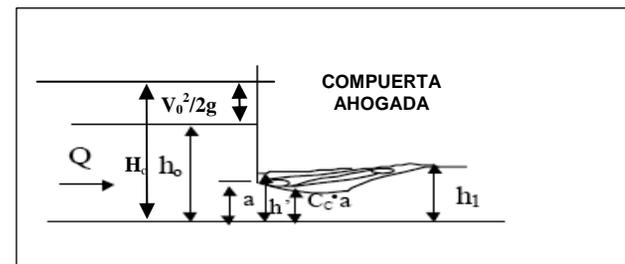
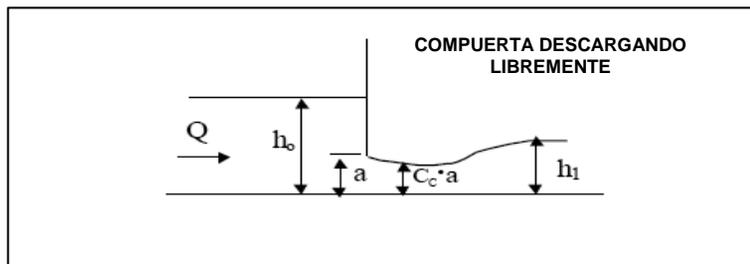
El caudal que fluye a través de la compuerta fue calculado utilizando la ecuación 3.5 para el flujo con descarga libre y las ecuaciones 3.7 a 3.9 para el flujo con descarga ahogada. Los resultados obtenidos para diferentes profundidades aguas arriba de la estructura y considerando la compuerta totalmente abierta se presentan en el Cuadro 5.2.

### 5.4.3 Cálculo de Caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero

El cálculo de los caudales para diferentes tirantes o profundidades aguas arriba y considerando la compuerta totalmente abierta cuando se presenta flujo superior e inferior en la estructura fue realizado utilizando las ecuaciones 3.10 a 3.13. Los valores obtenidos se presentan en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.2. Cálculo del Caudal a través de la Compuerta

| Profundidad aguas arriba de la compuerta $h_0$ (m) | Profundidad aguas arriba de la compuerta $h_0$ / Abertura de la compuerta a $h_0/a$ | Flujo con Descarga Libre          |                             |                        | Flujo con Descarga Ahogada                        |                                       |  |  |  |   |
|--|---|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|---|
|  |   | Coefficiente de contracción $C_c$ | Coefficiente de gasto $C_D$ | Caudal $Q$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la compuerta $h_1$ (m) | Caudal asumido $Q_{asum}$ ( $m^3/s$ ) | Altura en la sección de la vena contraída $h'$ (m) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_0$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_0$ (m) | Caudal calculado $Q_{calc}$ ( $m^3/s$ ) |
| 0,75   | 1,07  | 0,95                              | 0,69                        | 0,93                   | 0,70  | 0,46                                  | 0,69   | 0,86   | 0,79   | 0,46                                    |
| 0,80   | 1,14  | 0,91                              | 0,68                        | 0,94                   | 0,75  | 0,48                                  | 0,72   | 0,82   | 0,83   | 0,48                                    |
| 0,85   | 1,21  | 0,87                              | 0,66                        | 0,95                   | 0,75  | 0,64                                  | 0,68   | 1,02   | 0,90   | 0,64                                    |
| 0,90   | 1,29  | 0,84                              | 0,65                        | 0,96                   | 0,80  | 0,65                                  | 0,69   | 0,96   | 0,95   | 0,65                                    |
| 0,95   | 1,36  | 0,80                              | 0,64                        | 0,96                   | 0,80  | 0,78                                  | 0,61   | 1,07   | 1,01   | 0,78                                    |
| 1,00   | 1,43  | 0,77                              | 0,62                        | 0,97                   | 0,80  | 0,95                                  | 0,45   | 1,21   | 1,07   | 0,95                                    |
| 1,10   | 1,57  | 0,73                              | 0,60                        | 0,98                   | 1,00  | 0,60                                  | 0,85   | 0,67   | 1,12   | 0,59                                    |
| 1,15   | 1,64  | 0,71                              | 0,59                        | 0,99                   | 1,05  | 0,55                                  | 0,92   | 0,58   | 1,17   | 0,55                                    |
| 1,20   | 1,71  | 0,70                              | 0,59                        | 1,00                   | 1,10  | 0,52                                  | 0,98   | 0,52   | 1,21   | 0,52                                    |
| 1,25   | 1,79  | 0,69                              | 0,58                        | 1,01                   | 1,05  | 0,79                                  | 0,73   | 0,74   | 1,28   | 0,79                                    |
| 1,30   | 1,86  | 0,68                              | 0,58                        | 1,03                   | 1,10  | 0,75                                  | 0,81   | 0,66   | 1,32   | 0,75                                    |
| 1,35   | 1,93  | 0,68                              | 0,58                        | 1,05                   | 1,10  | 0,89                                  | 0,66   | 0,75   | 1,38   | 0,89                                    |
| 1,40   | 2,00  | 0,68                              | 0,58                        | 1,07                   | 1,20  | 1,15                                  | 0,23   | 0,92   | 1,44   | 1,15                                    |



Cuadro 5.3. Cálculo del Caudal con Flujo Simultáneo a través del Vertedero y la Compuerta

| Profundidad aguas arriba de la estructura (m) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_3$ | Caudal Asumido $Q_{sum}$ ( $m^3/s$ ) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_o$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_o$ (m) | Energía sobre el Vertedero $H$ (m) | Carga sobre el vertedero/ Altura de la estructura sin flujo $h/W$ | Coeficiente de descarga $C_q^*$ | Caudal sobre el vertedero $Q_a$ ( $m^3/s$ ) | Caudal a través de la compuerta $Q_b$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_2$ |                                    |
|---|--|--------------------------------------|--|--|------------------------------------|---|---------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
|   |  |                                      |  |  |                                    |   |                                 |   |   | calculada con la ecuación 3.12 (m)             | calculada con la ecuación 3.13 (m) |
| 1,05  | 1,00   | 0,4                                  | 0,15   | 1,05   | 0,05                               | 0,17  | 0,62                            | 0,01  | 0,39  | 0,94   | 0,94                               |
| 1,10  | 1,00   | 0,53                                 | 0,18   | 1,10   | 0,10                               | 0,33  | 0,62                            | 0,02  | 0,51  | 0,90   | 0,90                               |
| 1,15  | 1,00   | 0,66                                 | 0,21   | 1,15   | 0,15                               | 0,50  | 0,62                            | 0,04  | 0,62  | 0,84   | 0,84                               |
| 1,20  | 1,00   | 0,75                                 | 0,23   | 1,20   | 0,20                               | 0,67  | 0,62                            | 0,07  | 0,68  | 0,80   | 0,80                               |
| 1,25  | 1,10   | 0,68                                 | 0,19   | 1,25   | 0,25                               | 0,83  | 0,62                            | 0,09  | 0,59  | 0,95   | 0,95                               |
| 1,30  | 1,10   | 0,78                                 | 0,21   | 1,30   | 0,30                               | 1,00  | 0,62                            | 0,12  | 0,66  | 0,91   | 0,91                               |
| 1,35  | 1,15   | 0,82                                 | 0,21   | 1,35   | 0,35                               | 1,17  | 0,62                            | 0,15  | 0,67  | 0,95   | 0,95                               |
| 1,40  | 1,25   | 0,76                                 | 0,18   | 1,40   | 0,40                               | 1,33  | 0,62                            | 0,19  | 0,57  | 1,10   | 1,10                               |

## 5.5 Estudio de Suelos

En el sitio en el que se proyecta construir la estructura hidráulica se realizó un sondeo hasta encontrar la condición de rechazo a los 5,00 m de profundidad, se realizó el ensayo de penetración estándar, se tomaron muestras representativas del subsuelo y se midió el nivel freático; a las muestras del subsuelo se les realizaron varias pruebas de laboratorio. Los resultados derivados del trabajo de campo y de laboratorio se presentan en el Anexo 1. Las características y propiedades de los suelos encontrados en el sitio de la estructura hidráulica se presentan a continuación.

### 5.5.1 Resultados de la Investigación Geotécnica

Desde el nivel del terreno hasta una profundidad de 2,60 m el suelo está conformado por Limos arcillosos con arena de color variable entre café y gris. Son suelos de mediana a alta plasticidad, de los tipos MH y MH-ML, saturados, con un contenido de humedad por encima de su límite plástico, de consistencia blanda a muy blanda (N: 2 a 5 golpes/pie).

Subyaciendo los limos y hasta profundidad de 5,00 mts aparecen arenas limosas de color gris, de gradación fina, con una fracción pasa tamiz No. 200 que oscila entre el 12% y el 19%, de compacidad baja (N: 3 a 4 golpes/pie). Su ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) se estima alrededor de 28°, con una densidad relativa del orden del 30%.

El estrato mas profundo detectado es una grava arenosa densa, de color gris (N = 70 golpes/pie). Su ángulo de fricción interna se estima en 40° aproximadamente, con una densidad relativa superior al 80%.

El nivel freático aparece en este sitio a profundidad de 1,60 mts medidos a partir del nivel actual del terreno.

### Análisis de Resultados

En el sitio en el que se realizó el sondeo predominan gruesos depósitos de suelos de origen sedimentario reciente, blandos a saturados, con un nivel freático relativamente superficial, que en lo que respecta a los suelos superficiales están constituidos por limos desde baja hasta mediana plasticidad, los cuales suprayacen a depósitos granulares que pueden ser arenas o gravas, de compacidad baja a media en lo que a las arenas se refiere, y densas en relación con las gravas. La existencia de suelos blandos a muy blandos superficiales es razonable si se tiene en cuenta que el sitio investigado corresponde a una madreveja en la que predominan suelos saturados.

Entre los 2,60 a 5,00 mts de profundidad se detectaron arenas, de baja compacidad, saturadas y potencialmente licuables bajo cargas vibratorias o de sismo. Dado que el espesor de suelo no licuable sobre ellas es del orden de los 2,60 mts, la posible licuación podría generar daños sobre la superficie del terreno.

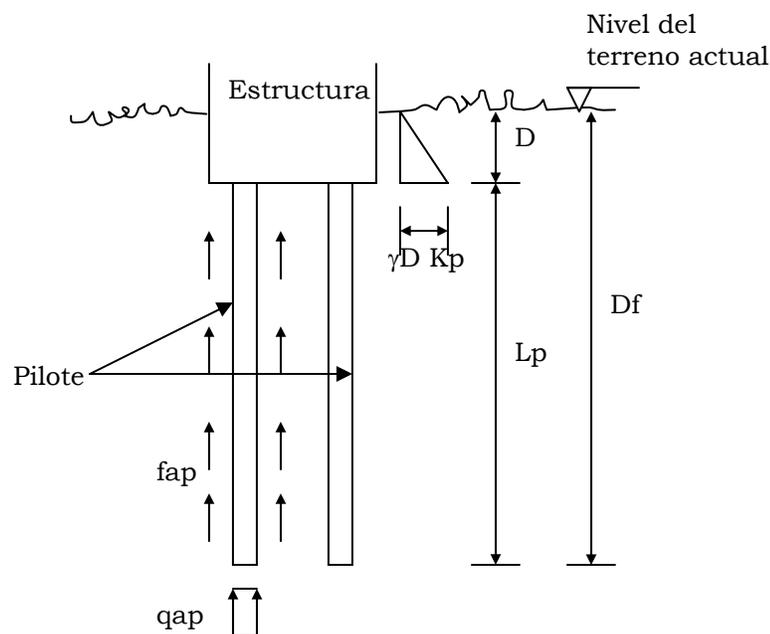
### 5.5.2 Recomendaciones para la fundación de la estructura

Teniendo en cuenta las características blandas a muy blandas de los limos detectados, la fundación de tipo superficial para la estructura hidráulica a base de zapatas convencionales no es la más indicada, debido a que la capacidad portante de los suelos superficiales se estima del orden de los  $0,20$  a  $0,30 \text{ Kg/cm}^2$ , existiendo el riesgo grande de asentamientos por consolidación.

Se recomienda por lo tanto el empleo de fundaciones profundas, conformadas por pilotes hincados o pre-excavados, llevadas hasta los depósitos de gravas densas. La profundidad de los pilotes es del orden de los  $5,00$  mts.

Para efectos del dimensionamiento de los pilotes se pueden emplear los siguientes parámetros del suelo (Figura 5.3):

**Figura 5.3 Esquema de la Fundación Recomendada**



En donde:

$D$  : Profundidad de apoyo de la estructura.

$L_p$  : Longitud del pilote.

$D_f$  : Profundidad de fundación medida a partir del nivel del terreno. Igual a  $5,00$  m

$f_{ap}$  = Capacidad portante admisible por fricción. Igual a  $0,15 \text{ kg/cm}^2$  con un factor de seguridad de  $2,0$

$q_{ap}$  = Capacidad portante admisible en la punta. Igual a  $4,0 \text{ kg/cm}^2$  con un factor de seguridad de 3,0

$K_H$  = Módulo de reacción del suelo  $1,8 \text{ Kg/cm}^2/\text{cm}$

La resistencia neta por pilote o pila se determina de la siguiente manera:

$$Q_n = Q_p + Q_f - W$$

$$Q_{nT} = Q_f + W$$

En donde:

$Q_n$  : Resistencia neta a compresión.

$Q_{nT}$ : Resistencia neta a tracción.

$Q_p$ : Resistencia en la punta.

$Q_f$ : Resistencia por fricción.

$W$ : Peso del caisson, pila o pilote.

Los valores anteriores se estiman en función de las dimensiones del pilote, pila o caisson, y de los valores de capacidad portante recomendados.

Para efectos de compensar las fuerzas horizontales que puedan actuar sobre la estructura se puede emplear la reacción horizontal de los pilotes estimada en función del módulo de reacción horizontal del suelo ( $K_H$ ), además de la resistencia pasiva del suelo proporcionada por la profundidad de embebimiento o apoyo de la estructura ( $D$ ), tal como se muestra en la Figura 5.3. El coeficiente de presión pasiva ( $K_p$ ) puede tomarse como 2.0 y el peso unitario del suelo ( $\gamma$ ) como  $1,8 \text{ ton/m}^3$ . Si se desea estimar la presión activa, el coeficiente ( $K_a$ ) es 0,50.

Para efectos de evaluar las fuerzas sísmicas que actúan sobre las estructuras proyectadas se puede emplear el Espectro Elástico de Aceleraciones dado por la Norma NSR-98, teniendo en cuenta que el tipo de perfil del suelo en el sitio se asemeja al S3 de la Norma, y que, por lo tanto, el Coeficiente de Sitio ( $S$ ) es de 1,5. Debe tenerse en cuenta que la obra se localiza en una zona de amenaza sísmica alta, siendo por lo tanto el Coeficiente de Aceleración ( $A_a$ ) pico efectivo igual a 0,25.

Si se emplean pilotes hincados estos deben ser prefabricados, llevados hasta la profundidad mínima mencionada. En el caso de pilotes barrenados o pre-excavados estos se pueden realizar usando equipos mecánicos a rotación, mediante Augers Helicoidales para las excavaciones en limos y arcillas, y Bucket Augers para las excavaciones en arenas y gravas, utilizando la técnica de excavación con lodo bentonítico o polímeros para evitar derrumbes. El vaciado se hará bajo agua, mediante el Sistema "Tremie", es decir usando tubo embudo o "Trompa de Elefante". El concreto empleado en el vaciado debe tener un slump entre 6 y 7 pulg, para facilitar su colocación a través de la Trompa, y el llenado del pilote, caisson o pila. El lodo bentonítico debe ser dosificado por el Contratista para

garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación, con base en su mayor experiencia. Sin embargo, se estima que el lodo bentonítico debe tener una viscosidad Marsh mínima de 48 a 55 seg, una densidad del orden de los 1.025 gr/cm<sup>3</sup>, un contenido de arena menor al 1% y un espesor del “Cake” menor a 3,0 mm.

Técnicas de excavación manual, como es la excavación mediante anillos vaciados en el sitio no son viables, por la consistencia blanda a muy blanda del subsuelo, y la necesidad de acometer excavaciones en arena bajo el nivel freático, que si se acometen por este sistema pueden presentar serias dificultades constructivas por los derrumbes que se pueden originar, lo que termina en deteriorar el suelo de fundación y ocasionar el “descuelgue” de los anillos.

## 5.6 Diseño Estructural

El análisis estructural y la determinación de las cuantías de acero de refuerzo necesarias para garantizar la estabilidad de la obra fueron realizados por medio del software SISMICAD versión 14, el cual es un programa especializado de elementos finitos para el análisis, diseño, dibujo y determinación de cantidades de obra de estructuras civiles.

Los parámetros de diseño introducidos al modelo fueron los siguientes:

Método de cálculo: NSR – 98 Estado límite – AISC LRFD

Datos Sísmicos: NSR – 98 Método de la fuerza horizontal equivalente

Coefficiente de amenaza sísmica Tabla A.2-1  $A_a = 0.25$

Coefficiente de sitio Tabla A.2-3  $S = 1.5$

Coefficiente de Importancia Tabla A.2-4  $I = 1$

Capacidad de disipación de energía  $R = f_{ia} * f_{ib} * R_o = 4$

Altura media desde la base para calcular  $T_a$  (A.4-2)  $= 270$

Ct para calcular  $T_a$  (A.4-2)  $= 0.08$

Datos del suelo: Se utilizaron los datos obtenidos del estudio de suelos realizado para el diseño de esta estructura (ver ítem 5.5).

Los resultados arrojados por el modelo se presentan en el Anexo 2. En el Plano 2 se presenta el diseño estructural finalmente obtenido para esta obra y en el Plano 5 los detalles constructivos de la compuerta. En el Cuadro 5.4 se presenta el presupuesto de construcción de la estructura.

**Cuadro 5.4 Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal Guarinó**

| DESCRIPCION  | UNIDAD | CANTIDAD | VR. UNIT.    | VR. TOTAL (\$)       |
|--|--------|----------|--------------|----------------------|
| <b>PRELIMINARES</b>  |        |          |              |                      |
| Localización y Replanteo   | GL     |          |              | 500 000.00           |
| Manejo del agua durante la construcción (incluye bombeos)              | GL     |          |              | 2 000 000.00         |
| <b>EXCAVACIONES</b>  |        |          |              |                      |
| Zapata y aletas  | M3     | 7.8      | 15 000.00    | 117 600.00           |
| <b>RELLENOS</b>  |        |          |              |                      |
| Con material del sitio (detrás de las aletas)                          | M3     | 1.6      | 20 000.00    | 31 920.00            |
| <b>CONCRETO F`c = 350 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                   |        |          |              |                      |
| Para pilotes   | M3     | 2.5      | 550 000.00   | 1 375 000.00         |
| <b>HINCADO DE PILOTES</b>  | ML     | 24       | 200 000.00   | 4 800 000.00         |
| <b>CONCRETO F`c = 210 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                   |        |          |              |                      |
| Para zapata  | M3     | 2.4      | 350 000.00   | 840 000.00           |
| Muro y aletas  | M3     | 1.4      | 450 000.00   | 630 000.00           |
| Solado de limpieza espesor = 3"  | M3     | 0.5      | 200 000.00   | 100 000.00           |
| <b>ACERO DE REFUERZO Fy= 4200 Kg/cm2 (incluye corte y flejado)</b>     |        |          |              |                      |
| Diámetro 5/8"  | KG     | 328      | 2 400.00     | 787 200.00           |
| Diámetro 1/2"  | KG     | 173      | 2 400.00     | 415 200.00           |
| Diámetro 3/8"  | KG     | 128      | 2 400.00     | 307 200.00           |
| <b>COMPUERTA Y ELEMENTOS VARIOS</b>                                    |        |          |              |                      |
| Alambre negro No. 18   | KG     | 20       | 2 500.00     | 50 000.00            |
| Compuerta metálica deslizante / dimensiones: ancho=0,5 m, altura=0,7 m | UN     | 1        | 2 500 000.00 | 2 500 000.00         |
| <b>COSTO DIRECTO (materiales, mano de obra y equipos)</b>              |        |          |              | 14 454 120.00        |
| <b>COSTOS INDIRECTOS - A.U.I. ( 35% del costo directo)</b>             |        |          |              | 5 058 942.00         |
| <b>COSTO TOTAL</b>   |        |          |              | <b>19 513 062.00</b> |

## 6. DISEÑO HIDRAULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL LA BOLSA

### 6.1 Localización

El humedal La Bolsa está ubicado en el municipio de Andalucía. El canal de conexión entre el humedal y el río Cauca desemboca aproximadamente en la abscisa K 301 + 733. La estructura hidráulica que se diseñará estará ubicada sobre el canal de conexión a unos 30 m de la confluencia con el río Cauca.

### 6.2 Dimensionamiento de la Estructura

Para definir las dimensiones de la estructura hidráulica se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Dimensiones de la sección transversal del canal de conexión.
- Caudales de intercambio entre la madre vieja y el río Cauca.

Dado que el ancho de la parte superior de la sección transversal en la cual se ubicará la obra hidráulica es aproximadamente igual a 4.00 m, se adoptó un ancho de la pantalla de 4.00 m. Para la selección de la cota de la cresta del vertedero se procuró seleccionar un nivel tal que permitiera mantener una profundidad de agua de al menos 1.00 metro en la mayor parte del humedal y un intercambio de caudales frecuente entre el río y el humedal; se seleccionó el nivel 916.00 msnsm. El ancho y la altura del vertedero fueron definidos iguales a 1.00 m y 0,60 m, respectivamente; a la compuerta se le definió un ancho de 1.00 m y una abertura y 0.80 m. En la Figura 6.1 se presenta un esquema de las dimensiones definidas para la estructura hidráulica.

### 6.3 Cálculo de Caudales

Se determinaron los caudales que fluirán a través de las estructuras en los tres escenarios posibles: (i) flujo sólo sobre el vertedero, (ii) flujo sólo a través de la compuerta y (iii) flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta.

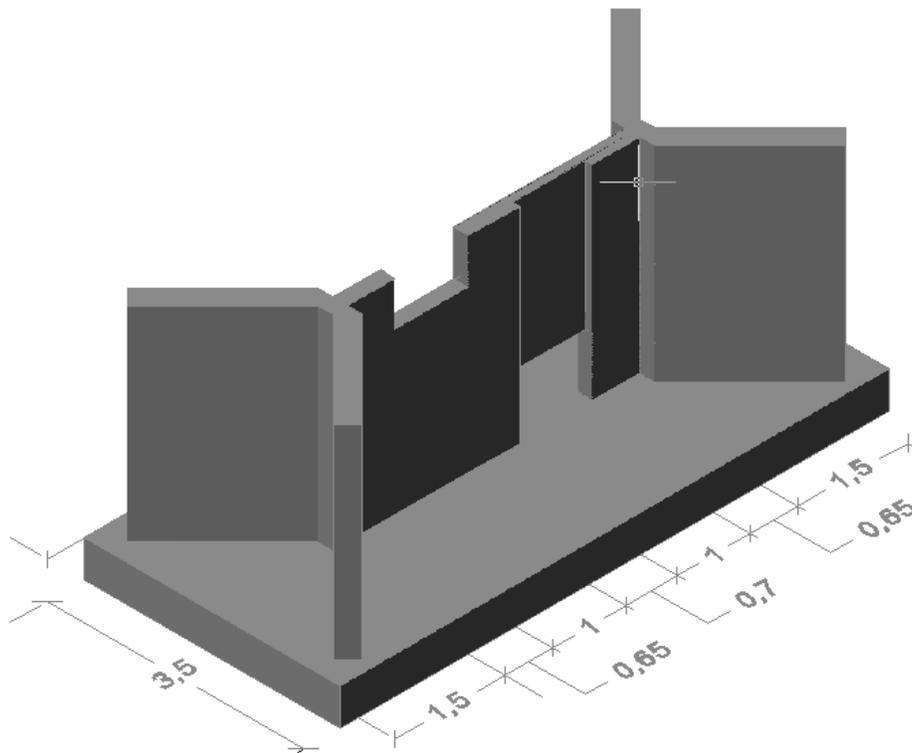
#### 6.3.1 Cálculo de Caudales sobre el Vertedero

El caudal que puede pasar sobre el vertedero para diferentes alturas o cargas sobre el mismo se calculó por medio de la ecuación 3.1. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 6.1.

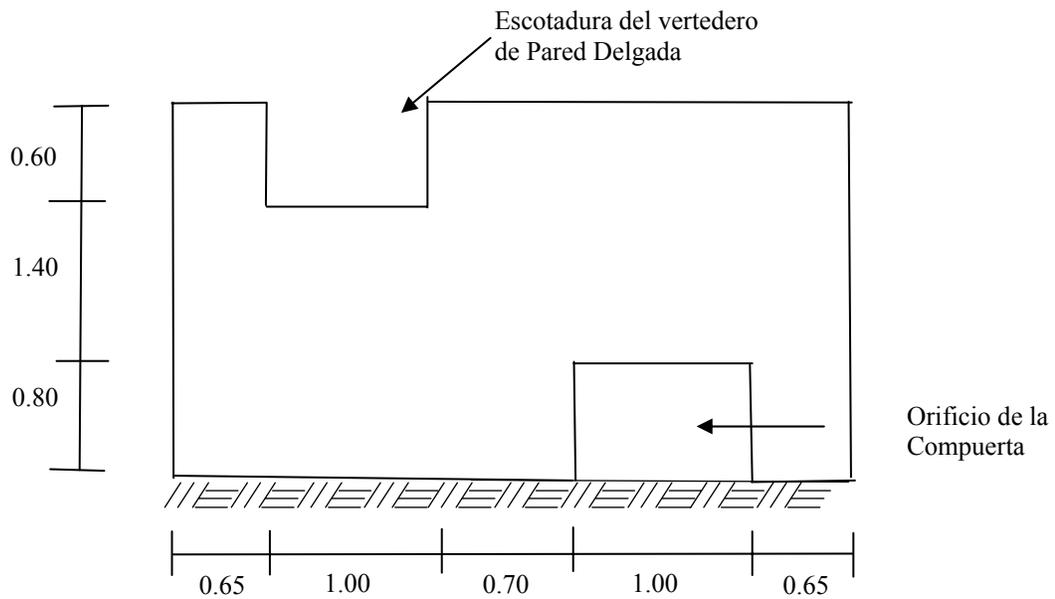
#### 6.3.2 Cálculo de Caudales a través de la Compuerta

El caudal que fluye a través de la compuerta fue calculado utilizando la ecuación 3.5 para el flujo con descarga libre y las ecuaciones 3.7 a 3.9 para el flujo con descarga ahogada. Los resultados obtenidos para diferentes profundidades aguas arriba de la estructura y considerando la compuerta totalmente abierta se presentan en el Cuadro 6.2.

**Figura 6.1 Dimensiones de la Estructura Hidráulica en el Humedal La Bolsa**



**a. Isometría de la Estructura**



**b. Vista Frontal de la Pantalla**

Nota: Dimensiones en metros

**Cuadro 6.1 Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal La Bolsa**

| Altura o carga sobre el vertedero, $h_1$ (m) | Coefficiente efectivo de descarga, $C_e$ | Caudal $Q$ (l/s) |
|--|--|------------------|
| 0,05   | 0,5889                                   | 19,43            |
| 0,10   | 0,5889                                   | 54,96            |
| 0,15   | 0,5888                                   | 100,96           |
| 0,20   | 0,5887                                   | 155,42           |
| 0,25   | 0,5887                                   | 217,18           |
| 0,30   | 0,5886                                   | 285,46           |
| 0,35   | 0,5886                                   | 359,68           |
| 0,40   | 0,5885                                   | 439,40           |
| 0,45   | 0,5884                                   | 524,26           |
| 0,50   | 0,5884                                   | 613,95           |

### 6.3.3 Cálculo de Caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero

El cálculo de los caudales para diferentes tirantes o profundidades aguas arriba y considerando la compuerta totalmente abierta cuando se presenta flujo superior e inferior en la estructura fue realizado utilizando las ecuaciones 3.10 a 3.13. Los valores obtenidos se presentan en el Cuadro 6.3.

## 6.4 Estudio de Suelos

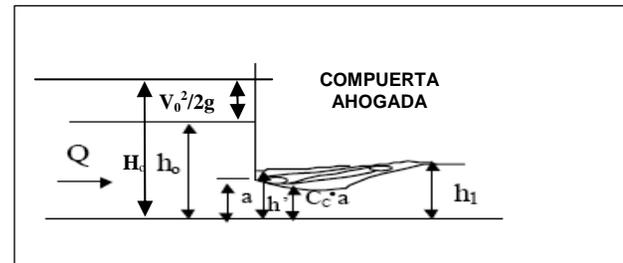
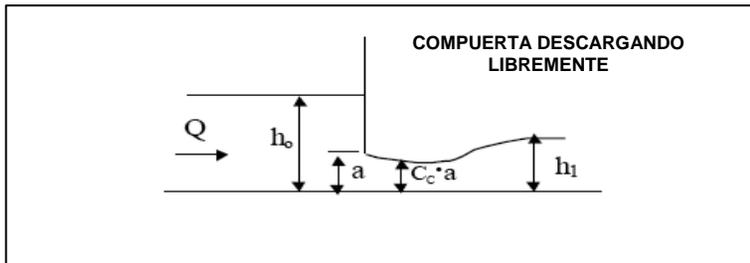
En el sitio en el que se proyecta construir la estructura hidráulica se realizó un sondeo de 8,50 m de profundidad, se realizó el ensayo de penetración estándar, se tomaron muestras representativas del subsuelo y se midió el nivel freático; a las muestras del subsuelo se les realizaron varias pruebas de laboratorio. Los resultados derivados del trabajo de campo y de laboratorio se presentan en el Anexo 1. Las características y propiedades de los suelos encontrados en el sitio de la estructura hidráulica se presentan a continuación.

### 6.4.1 Resultados de la Investigación Geotécnica

De acuerdo con los resultados del sondeo, el terreno está conformado por una capa vegetal superficial limo arcillosa de color café que contiene raicillas y presente un espesor 0,20 m. Posteriormente, se encuentra un limo arcilloso de color café hasta profundidad de 1,90 m, continuando después con un limo arcilloso de color gris el cual se profundiza hasta los 6,40 m. Se trata de un suelo de tipo cohesivo, de los tipos MH y ML de la Clasificación Unificada, de baja a mediana plasticidad, de consistencia blanda a muy blanda, saturado.

**Cuadro 6.2. Cálculo del Caudal a través de la Compuerta**

| Profundidad aguas arriba de la compuerta $h_o$ (m) | Profundidad aguas arriba de la compuerta $h_o$ / Abertura de la compuerta a $h_o/a$ | Flujo con Descarga Libre          |                             |                        | Flujo con Descarga Ahogada                        |                                       |  |  |  |   |
|--|---|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|---|
|  |   | Coefficiente de contracción $C_c$ | Coefficiente de gasto $C_D$ | Caudal $Q$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la compuerta $h_1$ (m) | Caudal asumido $Q_{asum}$ ( $m^3/s$ ) | Altura en la sección de la vena contraída $h'$ (m) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_o$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_o$ (m) | Caudal calculado $Q_{calc}$ ( $m^3/s$ ) |
| 0,85   | 1.06  | 0,96                              | 0,70                        | 2,27                   | 0,80  | 0,91                                  | 0,79   | 0,56   | 0,87   | 0,91                                    |
| 0,90   | 1.13  | 0,92                              | 0,68                        | 2,29                   | 0,85  | 0,95                                  | 0,83   | 0,53   | 0,91   | 0,95                                    |
| 0,95   | 1.19  | 0,89                              | 0,67                        | 2,31                   | 0,85  | 1,30                                  | 0,80   | 0,67   | 0,97   | 1,30                                    |
| 1,00   | 1.25  | 0,85                              | 0,66                        | 2,33                   | 0,85  | 1,56                                  | 0,76   | 0,75   | 1,03   | 1,56                                    |
| 1,05   | 1.31  | 0,82                              | 0,65                        | 2,34                   | 0,85  | 1,79                                  | 0,71   | 0,80   | 1,08   | 1,79                                    |
| 1,10   | 1.38  | 0,80                              | 0,63                        | 2,35                   | 0,85  | 1,99                                  | 0,64   | 0,83   | 1,13   | 1,99                                    |
| 1,15   | 1.44  | 0,77                              | 0,62                        | 2,36                   | 0,85  | 2,20                                  | 0,53   | 0,85   | 1,19   | 2,21                                    |
| 1,20   | 1.50  | 0,75                              | 0,61                        | 2,38                   | 1,00  | 2,60                                  | 0,28   | 0,94   | 1,25   | 2,61                                    |
| 1,50   | 1.88  | 0,68                              | 0,58                        | 2,52                   | 1,25  | 1,88                                  | 0,90   | 0,48   | 1,51   | 1,88                                    |
| 1,60   | 2.00  | 0,68                              | 0,58                        | 2,62                   | 1,30  | 2,08                                  | 0,86   | 0,48   | 1,61   | 2,08                                    |
| 1,70   | 2.13  | 0,69                              | 0,60                        | 2,75                   | 1,40  | 2,00                                  | 1,03   | 0,42   | 1,71   | 2,01                                    |
| 1,90   | 2.38  | 0,74                              | 0,64                        | 3,15                   | 1,70  | 1,64                                  | 1,51   | 0,29   | 1,90   | 1,64                                    |



**Cuadro 6.3. Cálculo del Caudal con Flujo Simultáneo a través del Vertedero y la Compuerta**

| Profundidad aguas arriba de la estructura (m) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_3$ | Caudal Asumido $Q_{asum}$ (m <sup>3</sup> /s) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_o$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_o$ (m) | Energía sobre el Vertedero $H$ (m) | Carga sobre el vertedero/ Altura de la estructura sin flujo $h/W$ | Coeficiente de descarga $C_q^*$ | Caudal sobre el vertedero $Q_a$ (m <sup>3</sup> /s) | Caudal a través de la compuerta $Q_b$ (m <sup>3</sup> /s) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_2$ |                                    |
|---|--|---|--|--|------------------------------------|---|---------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
|   |  |   |  |  |                                    |   |                                 |   |   | calculada con la ecuación 3.12 (m)             | calculada con la ecuación 3.13 (m) |
| 1,45  | 1,20   | 1,95  | 0,44   | 1,46   | 0,06                               | 0,08  | 0,62                            | 0,04  | 1,91  | 0,84   | 0,84                               |
| 1,50  | 1,20   | 2,18  | 0,47   | 1,51   | 0,11                               | 0,17  | 0,62                            | 0,10  | 2,08  | 0,76   | 0,76                               |
| 1,55  | 1,20   | 2,45  | 0,50   | 1,56   | 0,16                               | 0,25  | 0,62                            | 0,17  | 2,28  | 0,65   | 0,65                               |
| 1,60  | 1,30   | 2,18  | 0,43   | 1,61   | 0,21                               | 0,33  | 0,62                            | 0,25  | 1,93  | 0,96   | 0,96                               |
| 1,65  | 1,30   | 2,45  | 0,46   | 1,66   | 0,26                               | 0,42  | 0,62                            | 0,34  | 2,11  | 0,89   | 0,89                               |
| 1,70  | 1,30   | 2,77  | 0,49   | 1,71   | 0,31                               | 0,50  | 0,62                            | 0,45  | 2,32  | 0,80   | 0,80                               |
| 1,75  | 1,30   | 3,05  | 0,52   | 1,76   | 0,36                               | 0,58  | 0,62                            | 0,56  | 2,49  | 0,74   | 0,74                               |
| 1,80  | 1,50   | 2,60  | 0,42   | 1,81   | 0,41                               | 0,67  | 0,62                            | 0,67  | 1,93  | 1,21   | 1,21                               |
| 1,85  | 1,50   | 2,95  | 0,46   | 1,86   | 0,46                               | 0,75  | 0,62                            | 0,80  | 2,15  | 1,15   | 1,15                               |
| 1,90  | 1,50   | 3,30  | 0,49   | 1,91   | 0,51                               | 0,83  | 0,62                            | 0,94  | 2,36  | 1,10   | 1,10                               |

El estrato siguiente es una arena limosa gris de compacidad baja a media, que se extiende hasta la máxima profundidad investigada de 8,50 mts. Su ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) se estima varía entre  $28^\circ$  y  $33^\circ$ , con una densidad relativa ( $D_r$ ) que se estima entre 30% y 60%. Estas arenas son de gradación fina, con una fracción pasa tamiz No. 200 que oscila entre el 15% y el 18%.

El nivel freático aparece a profundidad de 2,80 m, medida a partir del nivel actual del terreno en el sitio del sondeo.

### **Análisis de Resultados**

En el sitio en el que se realizó el sondeo predominan gruesos depósitos de suelos de origen sedimentario reciente, blandos a saturados, con un nivel freático relativamente superficial, que en lo que respecta a los suelos superficiales están constituidos por limos desde baja hasta mediana plasticidad, los cuales suprayacen a depósitos granulares que pueden ser arenas o gravas, de compacidad baja a media en lo que a las arenas se refiere, y densas en relación con las gravas. La existencia de suelos blandos a muy blandos superficiales es comprensible si se tiene en cuenta que el sitio investigado corresponde a una madreveja en la que predominan suelos saturados.

Las arenas sueltas (de baja compacidad) detectadas, por encontrarse saturadas, bajo el nivel freático presentan un potencial de licuación alto bajo cargas vibratorias o de sismo. Estas arenas están localizadas entre los 6,40 a 8,00 mts de profundidad aproximadamente, que corresponden a un espesor de suelo licuable de 1,60 mts de espesor. Sin embargo, dado que sobre ellas existen suelos limo arcillosos no licuables, de espesor 6,40 mts, la incidencia de la posible licuación de estas sobre la superficie del terreno es baja a nula.

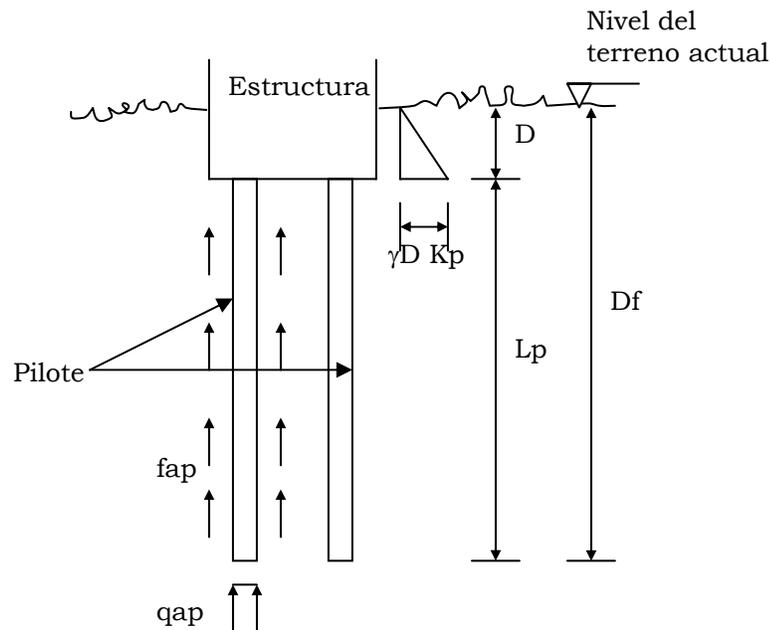
#### **6.4.2 Recomendaciones para la fundación de la estructura**

Teniendo en cuenta las características blandas a muy blandas de los limos detectados, la fundación de tipo superficial para la estructura hidráulica a base de zapatas convencionales no es la más indicada, debido a que la capacidad portante de los suelos superficiales se estima del orden de los  $0,20$  a  $0,30 \text{ Kg/cm}^2$ , existiendo el riesgo grande de asentamientos por consolidación.

Se recomienda por lo tanto el empleo de fundaciones profundas, conformadas por pilotes hincados o pre-excavados, llevadas hasta las arenas de compacidad media. Los pilotes deben llevarse hasta profundidad de 8,00 mts aproximadamente.

Para efectos del dimensionamiento de los pilotes se pueden emplear los siguientes parámetros del suelo (Figura 6.2):

Figura 6.2 Esquema de la Fundación Recomendada



En donde:

$D$  : Profundidad de apoyo de la estructura.

$L_p$  : Longitud del pilote.

$D_f$  : Profundidad de fundación medida a partir del nivel del terreno. Igual a 8,00 m.

$f_{ap}$  = Capacidad portante admisible por fricción. Igual a  $0,15 \text{ kg/cm}^2$  con un factor de seguridad de 2,0

$q_{ap}$  = Capacidad portante admisible en la punta. Igual a  $2,0 \text{ kg/cm}^2$  con un factor de seguridad de 3,0

$K_H$  = Módulo de reacción del suelo  $1,8 \text{ Kg/cm}^2/\text{cm}$

La resistencia neta por pilote o pila se determina de la siguiente manera:

$$Q_n = Q_p + Q_f - W$$

$$Q_{nT} = Q_f + W$$

En donde:

$Q_n$  : Resistencia neta a compresión.

$Q_{nT}$  : Resistencia neta a tracción.

$Q_p$  : Resistencia en la punta.

$Q_f$  : Resistencia por fricción.

$W$  : Peso del caisson, pila o pilote.

Los valores anteriores se estiman en función de las dimensiones del pilote, pila o caisson, y de los valores de capacidad portante recomendados.

Para efectos de compensar las fuerzas horizontales que puedan actuar sobre la estructura se puede emplear la reacción horizontal de los pilotes estimada en función del módulo de reacción horizontal del suelo ( $K_H$ ), además de la resistencia pasiva del suelo proporcionada por la profundidad de embebimiento o apoyo de la estructura ( $D$ ), tal como se muestra en la Figura 6.2. El coeficiente de presión pasiva ( $K_p$ ) puede tomarse como 2.0 y el peso unitario del suelo ( $\gamma$ ) como 1,8 ton/m<sup>3</sup>. Si se desea estimar la presión activa, el coeficiente ( $K_a$ ) es 0,50.

Para efectos de evaluar las fuerzas sísmicas que actúan sobre las estructuras proyectadas se puede emplear el Espectro Elástico de Aceleraciones dado por la Norma NSR-98, teniendo en cuenta que el tipo de perfil del suelo en el sitio se asemeja al S3 de la Norma, y que, por lo tanto, el Coeficiente de Sitio ( $S$ ) es de 1,5. Debe tenerse en cuenta que la obra se localiza en una zona de amenaza sísmica alta, siendo por lo tanto el Coeficiente de Aceleración ( $A_a$ ) pico efectivo igual a 0,25.

Si se emplean pilotes hincados estos deben ser prefabricados, llevados hasta la profundidad mínima mencionada. En el caso de pilotes barrenados o pre-excavados estos se pueden realizar usando equipos mecánicos a rotación, mediante Augers Helicoidales para las excavaciones en limos y arcillas, y Bucket Augers para las excavaciones en arenas y gravas, utilizando la técnica de excavación con lodo bentonítico o polímeros para evitar derrumbes. El vaciado se hará bajo agua, mediante el Sistema “Tremie”, es decir usando tubo embudo o “Trompa de Elefante”. El concreto empleado en el vaciado debe tener un slump entre 6 y 7 pulg, para facilitar su colocación a través de la Trompa, y el llenado del pilote, caisson o pila. El lodo bentonítico debe ser dosificado por el Contratista para garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación, con base en su mayor experiencia. Sin embargo, se estima que el lodo bentonítico debe tener una viscosidad Marsh mínima de 48 a 55 seg, una densidad del orden de los 1025 grs/cm<sup>3</sup>, un contenido de arena menor al 1% y un espesor del “Cake” menor a 3.0 mm.

Técnicas de excavación manual, como es la excavación mediante anillos vaciados en el sitio no son viables, por la consistencia blanda a muy blanda del subsuelo, y la necesidad de acometer excavaciones en arena bajo el nivel freático, que si se acometen por este sistema pueden presentar serias dificultades constructivas por los derrumbes que se pueden originar, lo que termina en deteriorar el suelo de fundación y ocasionar el “descuelgue” de los anillos.

## 6.5 Diseño Estructural

El análisis estructural y la determinación de las cuantías de acero de refuerzo necesarias para garantizar la estabilidad de la obra fueron realizados por medio del software SISMICAD

versión 14, el cual es un programa especializado de elementos finitos para el análisis, diseño, dibujo y determinación de cantidades de obra de estructuras civiles.

Los parámetros de diseño introducidos al modelo fueron los siguientes:

Método de cálculo: NSR – 98 Estado límite – AISC LRFD

Datos Sísmicos: NSR – 98 Método de la fuerza horizontal equivalente

Coefficiente de amenaza sísmica Tabla A.2-1  $A_a = 0.25$

Coefficiente de sitio Tabla A.2-3  $S = 1.5$

Coefficiente de Importancia Tabla A.2-4  $I = 1$

Capacidad de disipación de energía  $R = f_{ia} * f_{ib} * R_o = 4$

Altura media desde la base para calcular  $T_a$  (A.4-2)  $= 270$

$C_t$  para calcular  $T_a$  (A.4-2)  $= 0.08$

Datos del suelo: Se utilizaron los datos obtenidos del estudio de suelos realizado para el diseño de esta estructura (ver ítem 6.4).

Los resultados arrojados por el modelo se presentan en el Anexo 2. En el Plano 3 se presenta el diseño estructural finalmente obtenido para esta obra y en el Plano 5 los detalles constructivos de la compuerta. En el Cuadro 6.4 se presenta el presupuesto de construcción de la estructura.

Cuadro 6.4 Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal La Bolsa

| DESCRIPCION  | UNIDAD | CANTIDAD | VR. UNIT.    | VR. TOTAL (\$)       |
|--|--------|----------|--------------|----------------------|
| <b>PRELIMINARES</b>  |        |          |              |                      |
| Localización y Replanteo   | GL     |          |              | 500 000.00           |
| Manejo del agua durante la construcción (incluye bombeos)              | GL     |          |              | 2 000 000.00         |
| <b>EXCAVACIONES</b>  |        |          |              |                      |
| Zapata y aletas  | M3     | 39.5     | 15 000.00    | 592 200.00           |
| <b>RELLENOS</b>  |        |          |              |                      |
| Con material del sitio (detrás de las aletas)                          | M3     | 12       | 20 000.00    | 238 050.00           |
| <b>CONCRETO F`c = 350 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                   |        |          |              |                      |
| Para pilotes   | M3     | 7        | 550 000.00   | 3 850 000.00         |
| <b>HINCADO DE PILOTES</b>  | ML     | 75       | 200 000.00   | 15 000 000.00        |
| <b>CONCRETO F`c = 210 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                   |        |          |              |                      |
| Para zapata  | M3     | 11       | 350 000.00   | 3 850 000.00         |
| Muro y aletas  | M3     | 10       | 450 000.00   | 4 500 000.00         |
| Solado de limpieza espesor = 3"  | M3     | 2.5      | 200 000.00   | 500 000.00           |
| <b>ACERO DE REFUERZO Fy= 4200 Kg/cm2 (incluye corte y flejado)</b>     |        |          |              |                      |
| <b>Diámetro 5/8"</b>   | KG     | 1093     | 2 400.00     | 2 623 200.00         |
| <b>Diámetro 1/2"</b>   | KG     | 757      | 2 400.00     | 1 816 800.00         |
| <b>Diámetro 3/8"</b>   | KG     | 507      | 2 400.00     | 1 216 800.00         |
| <b>COMPUERTA Y ELEMENTOS VARIOS</b>                                    |        |          |              |                      |
| Alambre negro No. 18   | KG     | 75       | 2 500.00     | 187 500.00           |
| Compuerta metálica deslizante / dimensiones: ancho=1,0 m, altura=0,8 m | UN     | 1        | 3 500 000.00 | 3 500 000.00         |
| <b>COSTO DIRECTO (materiales, mano de obra y equipos)</b>              |        |          |              | 40 374 550.00        |
| <b>COSTOS INDIRECTOS - A.U.I. ( 35% del costo directo)</b>             |        |          |              | 14 131 092.50        |
| <b>COSTO TOTAL</b>   |        |          |              | <b>54 505 642.50</b> |

## 7. DISEÑO HIDRAULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL PITAL

### 7.1 Localización

El humedal Pital está ubicado en el municipio de Bugalagrande. El canal de conexión entre el humedal y el río Cauca desemboca aproximadamente en la abscisa K 304 + 800. La estructura hidráulica que se diseñará estará ubicada sobre el canal de conexión a unos 50 m de la confluencia con el río Cauca.

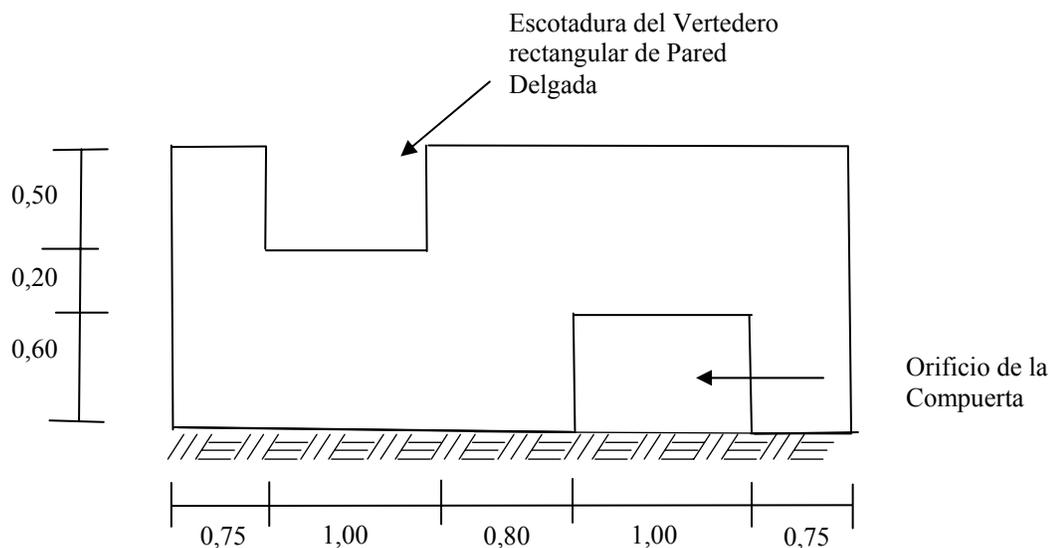
### 7.2 Dimensionamiento de la Estructura

Para definir las dimensiones de la estructura hidráulica se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Dimensiones de la sección transversal del canal de conexión.
- Caudales de intercambio entre la madre vieja y el río Cauca.

Dado que el ancho de la sección transversal en la cual se ubicará la obra hidráulica es ligeramente mayor a 4,0 m, se adoptó un ancho de la pantalla de 4,30 m. Para la selección de la cota de la cresta del vertedero se procuró seleccionar un nivel tal que permitiera mantener una profundidad de agua de al menos 1,00 metro en la mayor parte del humedal y un intercambio frecuente entre el río y el humedal; se seleccionó el nivel 915,50 msnm. El ancho y la altura del vertedero fueron definidos iguales a 1,00 y 0,50 m, respectivamente; a la compuerta se le definió un ancho de 1,00m y una abertura y 0,60 m. En la Figura 7.1 se presenta un esquema de las dimensiones definidas para la estructura hidráulica.

**Figura 7.1 Dimensiones de la Estructura Hidráulica en el Humedal El Pital**



Nota: Dimensiones en metros

### 7.3 Cálculo de caudales

Se determinaron los caudales que fluirán a través de las estructuras en los tres escenarios posibles: (i) flujo sólo sobre el vertedero, (ii) flujo sólo a través de la compuerta y (iii) flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta.

#### 7.3.1 Cálculo de caudales sobre el vertedero

El caudal que puede pasar sobre el vertedero para diferentes alturas o cargas sobre el mismo se calculó por medio de la ecuación 3.1. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 6.1.

**Cuadro 6.1 Cálculo de caudales sobre el vertedero del humedal Pital**

| Altura o carga sobre el vertedero, $h_1$ (m) | Coefficiente efectivo de descarga, $C_e$ | Caudal $Q$ (l/s) |
|--|--|------------------|
| 0,05   | 0,5889                                   | 19,43            |
| 0,10   | 0,5888                                   | 54,95            |
| 0,15   | 0,5887                                   | 100,93           |
| 0,20   | 0,5886                                   | 155,37           |
| 0,25   | 0,5884                                   | 217,09           |
| 0,30   | 0,5883                                   | 285,32           |
| 0,35   | 0,5882                                   | 359,48           |
| 0,40   | 0,5881                                   | 439,11           |
| 0,45   | 0,5880                                   | 523,87           |
| 0,50   | 0,5879                                   | 613,45           |

#### 7.3.2 Cálculo de caudales a través de la compuerta

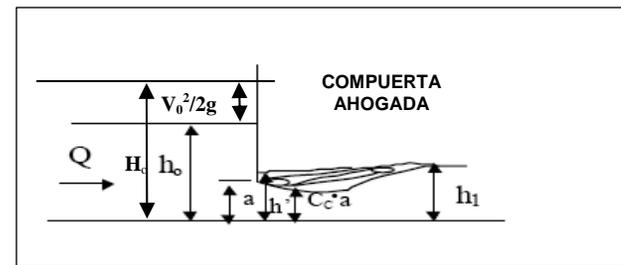
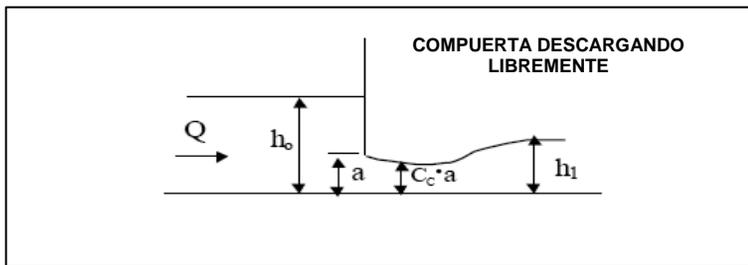
El caudal que fluye a través de la compuerta fue calculado utilizando la ecuación 3.5 para el flujo con descarga libre y las ecuaciones 3.7 a 3.9 para el flujo con descarga ahogada. Los resultados obtenidos para diferentes profundidades aguas arriba de la estructura y considerando la compuerta totalmente abierta se presentan en el Cuadro 6.2.

#### 7.3.3 Cálculo de caudales con descarga simultánea por la compuerta y el vertedero

El cálculo de los caudales para diferentes tirantes o profundidades aguas arriba y considerando la compuerta totalmente abierta cuando se presenta flujo superior e inferior en la estructura fue realizado utilizando las ecuaciones 3.10 a 3.13. Los valores obtenidos se presentan en el Cuadro 7.3.

**Cuadro 7.2. Cálculo del caudal a través de la compuerta**

| Profundidad aguas arriba de la compuerta (m) | Profundidad aguas arriba de la compuerta $h_0$ / Abertura de la compuerta a $h_0/a$ | Flujo con Descarga Libre          |                             |                        | Flujo con Descarga Ahogada                        |                                       |  |  |  |   |
|--|---|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|---|
|  |   | Coefficiente de contracción $C_c$ | Coefficiente de gasto $C_D$ | Caudal $Q$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la compuerta $h_1$ (m) | Caudal asumido $Q_{asum}$ ( $m^3/s$ ) | Altura en la sección de la vena contraída $h'$ (m) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_0$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_0$ (m) | Caudal calculado $Q_{calc}$ ( $m^3/s$ ) |
| 0,85   | 1,42  | 0,78                              | 0,63                        | 1,53                   | 0,80  | 0,73                                  | 0,74   | 0,45   | 0,86   | 0,73                                    |
| 0,90   | 1,50  | 0,75                              | 0,61                        | 1,54                   | 0,80  | 1,00                                  | 0,66   | 0,56   | 0,92   | 1,00                                    |
| 0,95   | 1,58  | 0,73                              | 0,60                        | 1,55                   | 0,80  | 1,25                                  | 0,55   | 0,65   | 0,97   | 1,25                                    |
| 1,00   | 1,67  | 0,71                              | 0,59                        | 1,57                   | 0,85  | 1,17                                  | 0,63   | 0,56   | 1,02   | 1,17                                    |
| 1,05   | 1,75  | 0,69                              | 0,58                        | 1,59                   | 0,85  | 1,40                                  | 0,48   | 0,62   | 1,07   | 1,41                                    |
| 1,10   | 1,83  | 0,68                              | 0,58                        | 1,62                   | 0,85  | 1,58                                  | 0,27   | 0,66   | 1,12   | 1,67                                    |
| 1,15   | 1,92  | 0,68                              | 0,58                        | 1,66                   | 0,95  | 1,68                                  | 0,30   | 0,65   | 1,17   | 1,68                                    |
| 1,20   | 2,00  | 0,68                              | 0,58                        | 1,70                   | 1,00  | 1,77                                  | 0,25   | 0,64   | 1,22   | 1,77                                    |



Cuadro 7.3. Cálculo del caudal con flujo simultáneo a través del vertedero y la compuerta

| Profundidad aguas arriba de la estructura (m) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_3$ | Caudal Asumido $Q_{sum}$ ( $m^3/s$ ) | Velocidad aguas arriba de la compuerta $V_o$ (m/s) | Energía en la sección aguas arriba de la compuerta $H_o$ (m) | Energía sobre el Vertedero $H$ (m) | Carga sobre el vertedero/ Altura de la estructura sin flujo $h/W$ | Coeficiente de descarga $C_q^*$ | Caudal sobre el vertedero $Q_a$ ( $m^3/s$ ) | Caudal a través de la compuerta $Q_b$ ( $m^3/s$ ) | Profundidad aguas abajo de la estructura $y_2$ |                                    |
|---|--|--------------------------------------|--|--|------------------------------------|---|---------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
|   |  |                                      |  |  |                                    |   |                                 |   |   | calculada con la ecuación 3.12 (m)             | calculada con la ecuación 3.12 (m) |
| 0,85  | 0,80   | 0,70                                 | 0,34   | 0,86   | 0,06                               | 0,25  | 0,62                            | 0,02  | 0,68  | 0,75   | 0,75                               |
| 0,90  | 0,80   | 0,95                                 | 0,43   | 0,91   | 0,11                               | 0,50  | 0,62                            | 0,07  | 0,88  | 0,71   | 0,71                               |
| 0,95  | 0,80   | 1,20                                 | 0,50   | 0,96   | 0,16                               | 0,75  | 0,62                            | 0,12  | 1,08  | 0,65   | 0,65                               |
| 1,00  | 0,80   | 1,38                                 | 0,54   | 1,01   | 0,21                               | 1,00  | 0,62                            | 0,18  | 1,20  | 0,61   | 0,61                               |
| 1,05  | 0,80   | 1,51                                 | 0,55   | 1,07   | 0,27                               | 1,25  | 0,62                            | 0,25  | 1,26  | 0,59   | 0,59                               |
| 1,10  | 0,80   | 1,69                                 | 0,58   | 1,12   | 0,32                               | 1,50  | 0,62                            | 0,33  | 1,36  | 0,55   | 0,55                               |
| 1,15  | 1,00   | 1,40                                 | 0,45   | 1,16   | 0,36                               | 1,75  | 0,62                            | 0,40  | 1,00  | 0,85   | 0,85                               |
| 1,20  | 1,00   | 1,62                                 | 0,49   | 1,21   | 0,41                               | 2,00  | 0,62                            | 0,48  | 1,14  | 0,81   | 0,81                               |
| 1,25  | 1,00   | 1,84                                 | 0,52   | 1,26   | 0,46                               | 2,25  | 0,62                            | 0,58  | 1,26  | 0,78   | 0,78                               |
| 1,30  | 1,00   | 2,04                                 | 0,55   | 1,32   | 0,52                               | 2,50  | 0,62                            | 0,68  | 1,36  | 0,76   | 0,76                               |

## 7.4 Estudio de Suelos

En el sitio en el que se proyecta construir la estructura hidráulica se realizó un sondeo de 7,00 m de profundidad, se realizó el ensayo de penetración estándar, se tomaron muestras representativas del subsuelo y se midió el nivel freático; a las muestras del subsuelo se les realizaron varias pruebas de laboratorio. Los resultados derivados del trabajo de campo y de laboratorio se presentan en el Anexo 1. Las características y propiedades de los suelos encontrados en el sitio de la estructura hidráulica se presentan a continuación.

### 7.4.1 Resultados de la Investigación Geotécnica

La columna estratigráfica correspondiente al sondeo realizado en este humedal indica la presencia de limos arcillosos de color variable con la profundidad entre café y gris que se extienden hasta profundidad de 6,30 mts. Son suelos saturados, de consistencia blanda, con un contenido de humedad superior a su límite plástico.

Subyaciendo los limos aparecen arenas limosas de color gris, las cuales se extienden hasta la máxima profundidad explorada de 7,00 m. Son suelos granulares de compacidad media, con una fracción pasa tamiz No. 200 del orden del 20%. La fracción de limo no presenta plasticidad. Su ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) se estima del orden de  $30^\circ$ , con una densidad relativa ( $D_r$ ) entre el 55% y 60%.

El nivel freático aparece a profundidad de 1,80 m, medida a partir del nivel actual del terreno.

### Análisis de Resultados

En el sitio en el que se realizó el sondeo predominan gruesos depósitos de suelos de origen sedimentario reciente, blandos a saturados, con un nivel freático relativamente superficial, que en lo que respecta a los suelos superficiales están constituidos por limos desde baja hasta mediana plasticidad, los cuales suprayacen a depósitos granulares que pueden ser arenas o gravas, de compacidad baja a media en lo que a las arenas se refiere, y densas en relación con las gravas. La existencia de suelos blandos a muy blandos superficiales es comprensible si se tiene en cuenta que el sitio investigado corresponde a una madreveja en la que predominan suelos saturados.

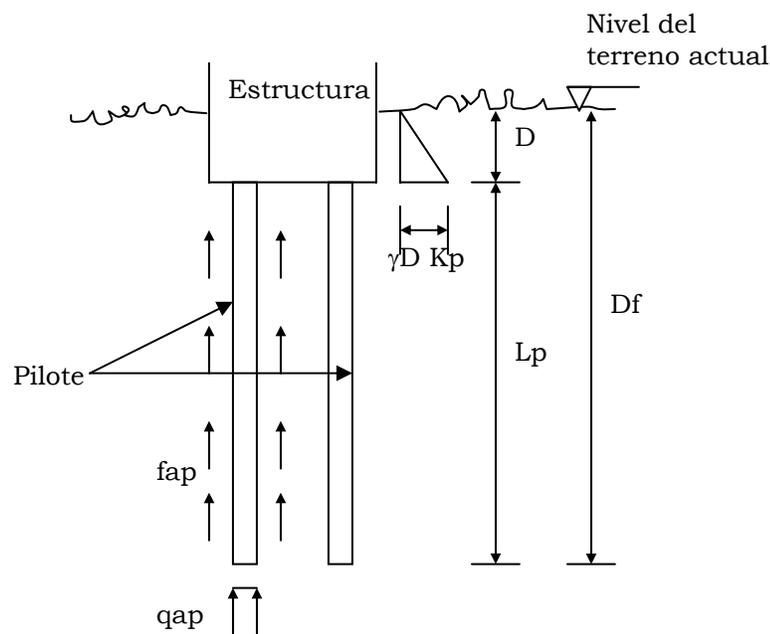
### 7.4.2 Recomendaciones para la Fundación de la Estructura

Teniendo en cuenta las características blandas a muy blandas de los limos detectados, la fundación de tipo superficial para la estructura hidráulica a base de zapatas convencionales no es la más indicada, debido a que la capacidad portante de los suelos superficiales se estima del orden de los 0,20 a 0,30  $\text{Kg/cm}^2$ , existiendo el riesgo grande de asentamientos por consolidación.

Se recomienda por lo tanto el empleo de fundaciones profundas, conformadas por pilotes hincados o pre-excavados, llevadas hasta las arenas de compacidad media. Los pilotes deben llevarse hasta profundidad de 6,30 mts aproximadamente.

Para efectos del dimensionamiento de los pilotes se pueden emplear los siguientes parámetros del suelo (Figura 7.2):

**Figura 7.2 Esquema de la Fundación Recomendada**



En donde:

$D$ : Profundidad de apoyo de la estructura.

$L_p$ : Longitud del pilote.

$D_f$ : Profundidad de fundación medida a partir del nivel del terreno. Igual a 6,30 m

$f_{ap}$  = Capacidad portante admisible por fricción. Igual a 0,15 kg/cm<sup>2</sup> con un factor de seguridad de 2,0

$q_{ap}$  = Capacidad portante admisible en la punta. Igual a 2,0 kg/cm<sup>2</sup> con un factor de seguridad de 3,0

$K_H$  = Módulo de reacción del suelo 1,8 Kg/cm<sup>2</sup>/cm

La resistencia neta por pilote o pila se determina de la siguiente manera:

$$Q_n = Q_p + Q_f - W$$

$$Q_{nT} = Q_f + W$$

donde:

$Q_n$ : Resistencia neta a compresión.

$Q_{nT}$ : Resistencia neta a tracción.

$Q_p$ : Resistencia en la punta.

$Q_f$ : Resistencia por fricción.

$W$ : Peso del caisson, pila o pilote.

Los valores anteriores se estiman en función de las dimensiones del pilote, pila o caisson, y de los valores de capacidad portante recomendados.

Para efectos de compensar las fuerzas horizontales que puedan actuar sobre la estructura se puede emplear la reacción horizontal de los pilotes estimada en función del módulo de reacción horizontal del suelo ( $K_H$ ), además de la resistencia pasiva del suelo proporcionada por la profundidad de embebimiento o apoyo de la estructura ( $D$ ), tal como se muestra en la Figura 4.3. El coeficiente de presión pasiva ( $K_p$ ) puede tomarse como 2,0 y el peso unitario del suelo ( $\gamma$ ) como 1,8 ton/m<sup>3</sup>. Si se desea estimar la presión activa, el coeficiente ( $K_a$ ) es 0,50.

Para efectos de evaluar las fuerzas sísmicas que actúan sobre las estructuras proyectadas se puede emplear el Espectro Elástico de Aceleraciones dado por la Norma NSR-98, teniendo en cuenta que el tipo de perfil del suelo en el sitio se asemeja al S3 de la Norma, y que, por lo tanto, el Coeficiente de Sitio ( $S$ ) es de 1,5. Debe tenerse en cuenta que la obra se localiza en una zona de amenaza sísmica alta, siendo por lo tanto el Coeficiente de Aceleración ( $A_a$ ) pico efectivo igual a 0,25.

Si se emplean pilotes hincados estos deben ser prefabricados, llevados hasta la profundidad mínima mencionada. En el caso de pilotes barrenados o pre-excavados estos se pueden realizar usando equipos mecánicos a rotación, mediante Augers Helicoidales para las excavaciones en limos y arcillas, y Bucket Augers para las excavaciones en arenas y gravas, utilizando la técnica de excavación con lodo bentonítico o polímeros para evitar derrumbes. El vaciado se hará bajo agua, mediante el Sistema “Tremie”, es decir usando tubo embudo o “Trompa de Elefante”. El concreto empleado en el vaciado debe tener un slump entre 6 y 7 pulg, para facilitar su colocación a través de la Trompa, y el llenado del pilote, caisson o pila. El lodo bentonítico debe ser dosificado por el Contratista para garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación, con base en su mayor experiencia. Sin embargo, se estima que el lodo bentonítico debe tener una viscosidad Marsh mínima de 48 a 55 seg, una densidad del orden de los 1025 grs/cm<sup>3</sup>, un contenido de arena menor al 1% y un espesor del “Cake” menor a 3.0 mm.

Técnicas de excavación manual, como es la excavación mediante anillos vaciados en el sitio no son viables, por la consistencia blanda a muy blanda del subsuelo, y la necesidad de acometer excavaciones en arena bajo el nivel freático, que si se acometen por este

sistema pueden presentar serias dificultades constructivas por los derrumbes que se pueden originar, lo que termina en deteriorar el suelo de fundación y ocasionar el “descuelgue” de los anillos.

## 7.5 Diseño Estructural

El análisis estructural y la determinación de las cuantías de acero de refuerzo necesarias para garantizar la estabilidad de la obra fueron realizados por medio del software SISMICAD versión 14, el cual es un programa especializado de elementos finitos para el análisis, diseño, dibujo y determinación de cantidades de obra de estructuras civiles.

Los parámetros de diseño introducidos al modelo fueron los siguientes:

Método de cálculo: NSR – 98 Estado límite – AISC LRFD

Datos Sísmicos: NSR – 98 Método de la fuerza horizontal equivalente

Coefficiente de amenaza sísmica Tabla A.2-1  $A_a = 0.25$

Coefficiente de sitio Tabla A.2-3  $S = 1.5$

Coefficiente de Importancia Tabla A.2-4  $I = 1$

Capacidad de disipación de energía  $R = f_{ia} * f_{ib} * R_o = 4$

Altura media desde la base para calcular  $T_a$  (A.4-2)  $= 270$

Ct para calcular  $T_a$  (A.4-2)  $= 0.08$

Datos del suelo: Se utilizaron los datos obtenidos del estudio de suelos realizado para el diseño de esta estructura (ver ítem 7.4).

Los resultados arrojados por el modelo se presentan en el Anexo 2. En el Plano 4 se presenta el diseño estructural finalmente obtenido para esta obra y en el Plano 5 los detalles constructivos de la compuerta. En el Cuadro 7.4 se presenta el presupuesto de construcción de la estructura.

Cuadro 7.4 Presupuesto para la construcción de la obra hidráulica en el humedal Pital

| DESCRIPCION  | UNIDAD | CANTIDAD | VR. UNIT.    | VR. TOTAL (\$)       |
|--|--------|----------|--------------|----------------------|
| <b>PRELIMINARES</b>  |        |          |              |                      |
| Localización y Replanteo   | GL     |          |              | 500 000.00           |
| Manejo del agua durante la construcción (incluye bombeos)              | GL     |          |              | 2 000 000.00         |
| <b>EXCAVACIONES</b>  |        |          |              |                      |
| Zapata y aletas  | M3     | 27.3     | 15 000.00    | 409 500.00           |
| <b>RELLENOS</b>  |        |          |              |                      |
| Con material del sitio (detràs de las aletas)                          | M3     | 6.6      | 20 000.00    | 132 600.00           |
| <b>CONCRETO F`c = 350 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                   |        |          |              |                      |
| Para pilotes   | M3     | 4.5      | 550 000.00   | 2 475 000.00         |
| <b>HINCADO DE PILOTES</b>  | ML     | 45       | 200 000.00   | 9 000 000.00         |
| <b>CONCRETO F`c = 210 Kg/cm2 (incluye formaleta)</b>                   |        |          |              |                      |
| Para zapata  | M3     | 11       | 350 000.00   | 3 850 000.00         |
| Muro y aletas  | M3     | 4        | 450 000.00   | 1 800 000.00         |
| Solado de limpieza espesor = 3"  | M3     | 2        | 200 000.00   | 400 000.00           |
| <b>ACERO DE REFUERZO Fy= 4200 Kg/cm2 (incluye corte y flejado)</b>     |        |          |              |                      |
| Diámetro 5/8"  | KG     | 902      | 2 400.00     | 2 164 800.00         |
| Diámetro 1/2"  | KG     | 487      | 2 400.00     | 1 168 800.00         |
| Diámetro 3/8"  | KG     | 232      | 2 400.00     | 556 800.00           |
| <b>COMPUERTA Y ELEMENTOS VARIOS</b>                                    |        |          |              |                      |
| Alambre negro No. 18   | KG     | 50       | 2 500.00     | 125 000.00           |
| Compuerta metálica deslizante / dimensiones: ancho=1,0 m, altura=0,6 m | UN     | 1        | 3 000 000.00 | 3 000 000.00         |
| <b>COSTO DIRECTO (materiales, mano de obra y equipos)</b>              |        |          |              | 27 582 500.00        |
| <b>COSTOS INDIRECTOS - A.U.I. ( 35% del costo directo)</b>             |        |          |              | 9 653 875.00         |
| <b>COSTO TOTAL</b>   |        |          |              | <b>37 236 375.00</b> |

## Presupuesto para la reconstrucción del dique en el humedal San Antonio

| DESCRIPCION   | UNIDAD | CANTIDAD | VR. UNIT. | VR. TOTAL (\$)       |
|---|--------|----------|-----------|----------------------|
| <b>PRELIMINARES</b>   |        |          |           |                      |
| Localización y Replanteo  | GL     |          |           | 500 000.00           |
| Manejo del agua durante la construcción (incluye bombeos)                 | GL     |          |           | 1 500 000.00         |
| Desmante y limpieza del área para el tramo de dique a reconstruir         | GL     |          |           | 300 000.00           |
| Demolición de alcantarilla existente                                      | GL     |          |           | 500 000.00           |
|   |        |          |           |                      |
| <b>EXCAVACIONES</b>   |        |          |           |                      |
| Descapote   | M3     | 54       | 15 000.00 | 806 250.00           |
|   |        |          |           |                      |
| <b>RELLENOS PARA CONFORMACION DEL DIQUE</b>                               |        |          |           |                      |
| Suministro, conformación y compactación mecánica de material seleccionado | M3     | 184      | 55 000.00 | 10 120 000.00        |
|   |        |          |           |                      |
| <b>OTRAS ACTIVIDADES</b>  |        |          |           |                      |
| Servicios de laboratorio (densidades de compactacion "in situ")           | GL     |          |           | 500 000.00           |
| Retiro de sobrantes (acarreo en volqueta)                                 | Viaje  | 10       | 60 000.00 | 600 000.00           |
| Empradización con pasto estrella  | M2     | 143      | 5 500.00  | 786 500.00           |
|   |        |          |           |                      |
| <b>COSTO DIRECTO (materiales, mano de obra y equipos)</b>                 |        |          |           | 15 612 750.00        |
| <b>COSTOS INDIRECTOS - A.U.I. ( 35% del costo directo)</b>                |        |          |           | 5 464 462.50         |
| <b>COSTO TOTAL</b>  |        |          |           | <b>21 077 212.50</b> |

## 8. CONSIDERACIONES FINALES

Se realizó el diseño hidráulico y estructural de las obras hidráulicas a construir en los canales de conexión de los humedales La Guinea, Guarinó, La Bolsa y Pital. Las dimensiones generales de estas estructuras son las siguientes:

| Humedal   | Pílotes |       | Zapata |       |         | Pantalla |       |         | Aletas |         |
|-----------|---------|-------|--------|-------|---------|----------|-------|---------|--------|---------|
|           | Núm.    | Long. | Largo  | Ancho | Espesor | Altura   | Ancho | Espesor | Long.  | Espesor |
| La Guinea | 4       | 6,00  | 4,50   | 2,50  | 0,40    | 1,90     | 2,00  | 0,25    | 1,00   | 0,20    |
| Guarinó   | 4       | 6,00  | 2,00   | 3,00  | 0,40    | 1,40     | 1,20  | 0,25    | 0,80   | 0,15    |
| La Bolsa  | 10      | 7,50  | 7,50   | 3,50  | 0,40    | 2,30     | 3,35  | 0,30    | 1,70   | 0,25    |
| Pital     | 6       | 7,50  | 7,80   | 3,50  | 0,40    | 1,30     | 4,30  | 0,25    | 1,70   | 0,20    |

Los sitios en los que se proyecta la construcción de las obras corresponden a depósitos sedimentarios recientes, blandos, saturados, con nivel freático superficial, por lo cual no resulta recomendable la cimentación de las estructuras sobre zapatas convencionales, dado que podrían presentarse asentamientos por consolidación. Adicionalmente, en la madreveja Guarinó podrían presentarse problemas de licuación de las arenas de baja compacidad. Debido a esto fue necesario cimentar las estructuras sobre pilotes llevados hasta estratos más profundos de compacidad media a alta. Dada la dificultad para realizar excavaciones en suelos demasiado blandos y bajo nivel freático, se optó por emplear pilotes prefabricados de sección transversal cuadrada, de 0,30 m lado y concreto de 5.000 psi de resistencia a la compresión.

Las dimensiones de las estructuras y los niveles de las crestas de los vertederos fueron definidos de acuerdo con las características geométricas de los humedales y canales de conexión, los niveles de agua del río Cauca y los niveles y volúmenes mínimos a mantener en los humedales durante la época de estiaje.

Las estructuras hidráulicas de mayor tamaño corresponden a las diseñadas en los humedales La Bolsa y Pital, las cuales presentan elementos de dimensiones similares, con excepción de la altura de la pantalla que es mayor en la obra del humedal La Bolsa. La estructura de menor tamaño corresponde a la diseñada en el humedal Guarinó.

La operación de las compuertas debe ser definida y ajustada una vez la obra sea construida y puesta en operación. El porcentaje de tiempo y los períodos en los que las compuertas deben estar abierta dependerán de la evolución del humedal, de las condiciones hidroclimatológicas predominantes y del comportamiento de las especies ícticas existentes. Se deben instalar miras o limnigrafos al interior de los humedales para realizar el registro

de los niveles de agua y de esta forma evaluar su permanencia y variación en el tiempo y su relación con los niveles de agua en el río Cauca.

Debe efectuarse un mantenimiento frecuente a los canales de conexión entre el río Cauca y los humedales con el fin de remover los sedimentos y materiales que se depositen en ellos, evitando así la disminución de su capacidad de conducción.

Se debe realizar un seguimiento permanente al comportamiento de los humedales una vez las estructuras entren en operación con el fin de controlar sus respuestas y realizar los ajustes a los que haya lugar para garantizar un intercambio de caudales adecuado entre el río Cauca y los humedales.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

# **CAPÍTULO 2**

## **ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS OBRAS**

# **CAPÍTULO 3**

## **CONSIDERACIONES GENERALES**

# **CAPÍTULO 4**

## **DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL LA GUINEA**

# **CAPÍTULO 5**

## **DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL GUARINÓ**

# **CAPÍTULO 6**

## **DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL LA BOLSA**

# **CAPÍTULO 7**

## **DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DEL HUMEDAL EL PITAL**

# **CAPÍTULO 8**

## **CONSIDERACIONES FINALES**

# **ANEXOS**