

**EVALUACIÓN DE CAUSAS Y MECANISMOS DE FALLA EN LAS
ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE LA RIVERA DEL RÍO DE ORO DEBIDO
A LA AVENIDA QUE SE PRESENTÓ EN FEBRERO DE 2005.**

**EDISON J. HERRERA HERNANDEZ
MIGUEL R. SILVA MONSALVE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2006

**EVALUACIÓN DE CAUSAS Y MECANISMOS DE FALLA EN LAS
ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE LA RIVERA DEL RÍO DE ORO DEBIDO
A LA AVENIDA QUE SE PRESENTÓ EN FEBRERO DE 2005.**

**EDISON J. HERRERA HERNANDEZ
MIGUEL R. SILVA MONSALVE**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR
Ing. JAIME SUAREZ DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2006.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	
INTRODUCCION	1
INFORMACIÓN EXISTENTE Y DE CAMPO	3
1. INVENTARIO DE LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE LA RIVERA DEL RIO DE ORO UBICADAS ENTRE LOS PR 0+0.00 Y PR 11+750.	4
1.1 SECTOR 1: BAHONDO A PARQUE GALLINERAL	5
1.2 SECTOR 2: PARQUE GALLINERAL AL POBLADO	11
1.3 SECTOR 3: EL POBLADO A SACEITES	23
1.4 SECTOR 4: SACEITES A PARQUE INDUSTRIAL 1	28
2 SOCAVACION GENERAL	30
2.1 MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV MODIFICADO POR MAZA	30
2.1.1 CALCULO DE UR	32
2.1.2 CALCULO DE UE .	36
2.1.3 CALCULO DE SOCAVACION (D_s) PARA SUELOS HOMOGENEOS.	38
2.1.4 CALCULO DE SOCAVACION (D_s) PARA SUELOS HETEROGENEOS.	39
2.1.5 SOCAVACION GENERAL CALCULADA CUANDO LA RUGOSIDAD NO ES UNIFORME EN LA SECCION	40
2.1.6 EFECTOS SOBRE LA SOCAVACION CUANDO EL FLUJO TRANSPORTA BASTANTE SEDIMENTO EN SUSPENSION	41

2.1.7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE MAZA.	43
2.2	DATOS DE ENTRADA	45
2.2.1	CAUDAL	45
2.2.2	PERIODO DE RETORNO	46
2.2.3	D_{84}	46
2.2.4	PESO ESPECÍFICO DEL AGUA	46
2.2.5	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA SECCIÓN	46
2.3	CALCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN	47
2.4	MÉTODO DE LAURSEN	47
3.	CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DEL LECHO DEL RIO DE ORO	58
3.1	EQUIPO DE MUESTREO	59
3.2	TOMA DE MUESTRAS	59
3.3	CARACTERIZCION VISUAL DE LOS MATERIALES DEL LECHO	61
3.4	GRANULOMETRIA DEL MATERIAL DEL LECHO DEL RIO DE ORO	65
4.	FORMACIONES GEOLÓGICAS DEL RIO DE ORO	67
4.1	INFLUENCIA DE LA FORMACIÓN GEOLÓGICA EN LA ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA	68
5.	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y DINÁMICAS DEL RÍO DE ORO	73
5.1	FACTORES GEOFORMOLOGICOS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LAS CORRIENTES	74
5.1.1	TAMAÑO DEL RÍO	76
5.1.2	HÁBITO DE FLUJO	76
5.1.3	MATERIAL DEL LECHO	77
5.1.4	ESCENARIO DEL VALLE	77
5.1.5	PLANICIES DE INUNDACIÓN	78
5.1.6	DIQUES NATURALES	79
5.1.7	INCISIÓN VISIBLE	79

5.1.8	LIMITES DEL CAUSE Y VEGETACIÓN	79
5.1.9	SINUOSIDAD	82
5.1.10	RIOS TRENZADOS	83
5.1.11	RÍOS CON BRAZOS DIVERGENTES (ANABRANCHED)	84
5.2	PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE INESTABILIDAD DEL RÍO	84
5.2.1	PROCEDIMIENTO GENERAL DE SOLUCIÓN	85
5.2.2	ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO CUALITATIVO (NIVEL 1)	86
5.2.3	ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO CUALITATIVO GENERAL DEL RÍO DE ORO	88
5.3	DINÁMICA EL RÍO DE ORO	94
6.	PROCESOS DE EROSION EN LAS RIBERAS DEL RIO DE ORO	96
6.1	INVENTARIO DE LOS PRINCIPALES SITIOS EN LOS QUE SE DETECTARON PROCESOS DE EROSIÓN	97
6.2	EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE EROSION	100
6.2.1	SEGUIMIENTO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	103
	CONCLUSIONES	106
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	108
	ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.	Socavación en el PR0+278. Maza.	47
TABLA 2.	Socavación en el PR2+528. Margen izquierda. Maza.	49
TABLA 3.	Socavación en el PR2+528. Margen derecha. Maza.	49
TABLA 4.	Socavación en el PR2+752. Maza.	50
TABLA 5.	Socavación en el PR3+757. Maza.	51
TABLA 6.	Socavación en el PR4+908. Maza.	53
TABLA 7.	Evaluación de la sinuosidad del Río de Oro.	90
TABLA 8.	Interpretación de los parámetros observados	93

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Socavación en el PR0+278. Maza	47
FIGURA 2.	Socavación en el PR2+528.Maza	48
FIGURA 3.	Socavación en el PR2+752.Maza	50
FIGURA 4.	Socavación en el PR3+757. Maza	51
FIGURA 5.	Socavación en el PR4+908. Maza	52
FIGURA 6.	Socavación en el PR0+278. Laursen	54
FIGURA 7.	Socavación en el PR2+528. Laursen	55
FIGURA 8.	Socavación en el PR2+752. Laursen	55
FIGURA 9.	Socavación en el PR3+757. Laursen	56
FIGURA 10.	Socavación en el PR4+908. Laursen	56
FIGURA 11.	Curvas granulométricas de las primeras 10 zonas	65
FIGURA 12.	Curva granulométrica. Zona 7 - PR 2+530	66
FIGURA 13.	Factores geomorfológicos que afectan la estabilidad de las corrientes. (Adaptado de Brice y Blodgett)	75
FIGURA 14.	Diagrama de flujo para un análisis de nivel 1	87
FIGURA 15.	Analogía de la balanza de Lane (1955)	91
FIGURA 16.	Inundación de 1973. Tomada de 9-PPT-B-EVENTOS Suárez (2005)	92
FIGURA 17.	Inundación de 1973. Tomada de 9-PPT-B-EVENTOS Suárez (2005)	95

LISTA DE FOTOS

FOTO 1.	Lecho del río en el PR 2+530. Marco de referencia de 1.00m * 1.00m con abscisas y ordenadas	61
FOTO 2.	Relleno Vía a Zapatota	97
FOTO 3.	Talud frente al Barrio las Marías	97
FOTO 4.	Talud Sagrado Corazón	98
FOTO 5.	Relleno Castilla Real	98
FOTO 6.	Rellenos barrió San Antonio del Carrizal	99
FOTO 7.	Talud frente a Solla	99
FOTO 8.	Talud frente al Barrio Convivir	100
FOTO 8	Talud del sagrado corazón. Evolución del proceso de erosión	103
FOTO 9	Talud del sagrado corazón .Erosión en el pie del talud	104

Resumen

TITULO: EVALUACIÓN DE CAUSAS Y MECANISMOS DE FALLA EN LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE LA RIVERA DEL RÍO DE ORO DEBIDO A LA AVENIDA QUE SE PRESENTÓ EN FEBRERO DE 2005.*

AUTORES: SILVA MONSALVE MIGUEL ROBERTO, HERRERA HERNANDEZ EDISON JAVIER**

PALABRAS CLAVE: Inundación de Girón 2005, Estructuras de Protección, Muestreo, Socavación, Geomorfología, Estabilidad.

DESCRIPCION: Este proyecto contiene un análisis de las causas y mecanismos de falla de las estructuras de protección ubicadas en la rivera del río de oro luego de la avenida que se presento en febrero de 2005, en el municipio de Girón departamento de Santander.

Debido a la destrucción de algunas de las estructuras de protección surgió la necesidad de realizar un inventario lo más completo posible de estas con el fin de evaluar su estado actual y determinar la causa de su destrucción.

Una de las primeras causas de falla detectadas fue la erosión de los materiales de la cimentación, por lo cual se procedió a estimar profundidades de socavación utilizando modelos de diferentes autores. Con lo anterior, se busca confrontar los datos obtenidos de las modelaciones con el comportamiento real de las estructuras ante el evento de referencia.

Basados en las características geológicas, geomorfológicos y dinámicas del río de oro se hace una evaluación de cómo estos factores afectan la estabilidad de las estructuras en estudio, además de una identificación de zonas del cauce en donde se activaron procesos de erosión, que pongan en riesgo el equilibrio natural del río.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Jaime Suárez Díaz

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF CAUSES AND MECHANISMS OF FAILS IN THE STRUCTURES OF PROTECTION OF THE BANK OF THE RIVER OF GOLD DUE TO THE AVENUE THAT WAS PRESENTED IN FEBRUARY OF 2005. *

AUTHOR: SILVA MONSALVE MIGUEL ROBERTO, HERRERA HERNANDEZ EDISON JAVIER**

WORDS KEY: Flood of Girón 2005, Structures of Protection, Sampling, Scour, Geomorphology, Stability.

DESCRIPTION: This project contains an analysis of the causes and mechanisms of flaw of the protection structures located in the bank of the river of gold after the flood that took place in February of 2005, in the municipality of Girón, department of Santander.

The need of carrying out a very exhaustive inventory of these protection structures arose due to their destruction. This was thought/conceived/organized in order to evaluate their current state and determine the cause of its destruction.

One of the first causes of flaw detected was the erosion of the materials of the foundation, reason why we proceeded to estimate scour depths using models of different authors. With the above-mentioned, it is sought to confront the data obtained of the simulations with the real behavior of the structures after the event of reference.

Based on the geologic characteristics, geomorphology and dynamic of the river of gold an evaluation is done to find out how these factors affect the stability of the structures in study. Besides, it identifies the areas where erosion processes that put in risk the natural balance of the river were activated.

* Work of investigation

** Faculty of Fisicomecánicas Sciences, School of Civil Engineering, Ing. Jaime Suárez Díaz .

INTRODUCCIÓN

Tras el evento extraordinario que tuvo lugar del 9 al 12 de febrero del 2005, se evidencio una vez más la impotencia del hombre cuando de contener las fuerzas de la naturaleza se trata.

Las inundaciones de sectores urbanos e industriales de los municipios de Bucaramanga y Girón, conllevaron a perdidas de vidas humanas, perdidas materiales y daños sociales hasta hoy en su mayoría no reparados.

Se presume que estos eventos se presentarán nuevamente y muy posiblemente con mayor fuerza destructiva, se hace entonces necesario evaluar el comportamiento o respuesta de las estructuras de protección situadas en el Río de Oro, y tratar de ponderar la participación de algunos de los tantos factores que son causa de fallas en las estructuras en mención.

No pretendemos reevaluar los diseños de las estructuras que se estudiarán, ni hacer un estudio de la totalidad de las estructuras de protección ubicadas en la rivera del río de Oro; el alcance de este proyecto de pregrado se ve limitado por factores económicos y de tiempo, por lo tanto se hará una descripción que incluye: objeto del muro, dimensiones, tipo de muro, cimentación, comportamiento durante el evento y el estado de socavación, con este inventario se tratara de establecer “si los hay” parámetros comunes en las estructuras que fallaron y de las que se mantuvieron en pie durante el evento.

Se estimaran profundidades de socavación en cinco estructuras, que son representativas dado su tamaño y de las cuales se dispone de suficiente

información. Para la estimación de las profundidades de socavación se utilizarán los modelos de diferentes autores. Con lo anterior, se busca confrontar los datos obtenidos de las modelaciones con el comportamiento real de las estructuras ante el evento de referencia.

Basados en las características geológicas de las diferentes formaciones que se presentan con mayor frecuencia a lo largo del cauce, se evaluará la influencia que tienen sobre el comportamiento de las estructuras en estudio. Esto con el fin de identificar las formaciones que presentan condiciones desfavorables para la cimentación de estructuras.

Se hará un recorrido por la dinámica del Río de Oro y junto con la caracterización geomorfológica, se hará una evolución cualitativa de la estabilidad global y lateral del río.

Mediante la identificación de zonas del cauce donde existan o que a raíz del evento de referencia, se hayan activado procesos de erosión, que representen un riesgo al equilibrio natural del río, se podrá estimar el efecto de estos procesos sobre la estabilidad natural del cauce y las estructuras de protección.

El estudio se apoyará en la información local existente, trabajo de campo, ensayos de laboratorio y algunas de las teorías existentes acerca de socavación en cauces, geomorfología y dinámica fluvial.

Esperamos que este estudio sea un incentivo, para que otros estudiantes de ingeniería civil y ramas afines, centren su atención en el estudio de los diferentes fenómenos que se presentan en la cuenca del río de Oro, y sobre todo que se de a conocer a la opinión pública como la acción antrópica degrada el equilibrio de la misma, trayendo consigo un sin número de vicisitudes como lo fue el evento ocurrido en febrero de 2005.

INFORMACIÓN EXISTENTE Y DE CAMPO

Del Documento Diagnostico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro realizado por GEOTECNOLÓGIA LTDA para la CDMB. [1] se obtuvo la información geología, hidráulica, batimétrica y cartográfica, información que no se presenta como anexo dado su gran volumen.

Los caudales que se utilizaron para la modelar la socavación, fueron estimados por GPH y forman parte del documento ya citado en el párrafo anterior.

En campo se efectuó una inspección detallada de los sitios donde se encuentran los muros a estudiar, analizando y tomando fotografías de cada uno de los sitios. También, se recorrió gran parte del cauce del río de Oro registrando mediante fotografías el estado de las estructuras y las zonas donde se identificaron procesos de erosión. Todo esto para realizar el inventario presentado en el capítulo 1, recopilar la información necesaria para caracterizar geomorfológicamente el río, y hacer seguimiento a la evolución del proceso de erosión de un talud específico.

1. INVENTARIO DE LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE LA RIVERA DEL RÍO DE ORO UBICADAS ENTRE LOS PR 0+0.00 Y PR 11+750

Ante el evento registrado en febrero de 2005, las estructuras de protección de la rivera del río de Oro, tuvieron respuestas clasificables en tres condiciones, tales son: destrucción total, destrucción parcial y sin daños apreciables.

Este inventario parcial de las estructuras en mención, tiene como fin el establecer parámetros comunes tales como el tipo de cimentación, tipo de muro (gaviones, concreto reforzado u otros) y verificación visual del estado final de las estructuras después del evento de referencia, todo esto con el fin de establecer posibles concordancias en dichos parámetros y la respuesta de las estructuras.

Este inventario abarca las estructuras ubicadas entre el PR 0+0.00 y PR 7+350, este abscisado corresponde al de los planos del Documento de Diagnostico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro realizado por GEOTECNOLÓGIA LTDA para la CDMB.

El inventario se divide en sectores, esta división es correspondiente a la distribución de los diferentes planos del estudio en mención.

En el anexo A, se presenta una matriz resumen de este capítulo, la cual tiene como fin el facilitar la lectura de lo consignado en las líneas siguientes. En el anexo B-1 se presenta en planos, la localización de las estructuras que forman parte del inventario. Adicionalmente en el anexo B-2 se presenta un registro fotográfico en el cual se anota la fecha del mismo y los comentarios alusivos a la respuesta de la estructura ante el evento de referencia.

1.1 SECTOR 1: BAHONDO A PARQUE GALLINERAL

- Localización: **PR 0 +165** - MURO 1
BATEA BAHONDO (margen derecha)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es conducir las aguas para disminuir los efectos de socavación ocasionados por la contracción junto al estribo de la batea, además cumple con la función de contener parte del relleno de la vía a Zapatoca.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: el muro se extiende desde aguas abajo de la batea hasta aguas arriba de la misma, con una longitud de 51m y una altura de 2.4m

Cimentación: este muro se encuentra cimentado sobre la formación Girón.

Comportamiento durante el evento de Febrero de 2005: durante el evento del día 9 de febrero el terraplén de la vía Zapatoca soportado por este muro, fue erosionado por la fuerza de arrastre del río, que se desbordó en este sitio debido a la fuerte contracción de la batea, ocasionando el cierre de esta vía durante varios días. La presencia de este tipo de estructuras ayudo a disminuir los efectos de socavación sobre la batea.

Características del proceso de erosión: aguas abajo de la batea no se evidenciaron procesos de socavación que pudieran poner en riesgo la estabilidad de la estructura. Aguas arriba, el muro presenta una

socavación cerca al estribo haciendo que este se partiera en el sitio en donde está la junta del muro con el estribo.

La presencia de este tipo de estructuras ayudó a disminuir los efectos de socavación sobre la batea. El relleno fue nuevamente conformado y se presentan procesos erosivos en la parte del relleno que quedó desprotegido aguas debajo de la batea.

- Localización: **PR 0+165 MURO - 2**
BATEA BAHONDO (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es proteger al estribo contra socavación en la base del mismo y contener parte del terraplén de acceso de la vía al sector de El Corregidor.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: el muro se extiende aguas abajo y aguas arriba del estribo izquierdo de la batea, con una longitud de 20m. Este tiene una altura variable que va desde 1.4m de altura al inicio de éste hasta 2.6m de altura al final del mismo.

Cimentación: este muro se encuentra cimentado sobre la formación Girón.

Comportamiento en el evento de febrero de 2005: durante el evento del 9 de febrero, el relleno que conforma la vía fue erosionado por la fuerza de arrastre del río, que se desbordó en este sitio debido a la contracción de la batea.

Características del proceso de erosión: en la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.

- Localización: **PR 0 + 250 MURO - 3**
VIA ZAPATOCA (margen derecha)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es proporcionarle un confinamiento al terraplén de la vía Zapatocha y proteger al relleno de los efectos erosivos del río.

Tipo de muro: muro en gaviones, con muro en concreto de 15cm de espesor, que protege la superficie expuesta a la abrasión. Los gaviones estaban conformados por una malla eslabonada y una mezcla de cantos redondeados con angulosos.

Dimensiones: este muro tiene una longitud de 50m aproximadamente y una altura de 2.0m

Cimentación: este muro se encontraba soportado sobre material aluvial el cual es fácilmente erosionable.

Comportamiento durante el evento de Febrero de 2005: durante el evento del 9 de febrero el relleno contenido por el muro se erosionó por la fuerza de arrastre del río, socavando a su vez la base sobre la cual estaba soportado el muro. El día 12 de febrero debido a que la base estaba erosionada, el muro fue totalmente destruido por la fuerza de las aguas. Aguas abajo del sitio en donde estaban ubicados estos gaviones es posible encontrar algunos de ellos y se observa que la malla en donde estaba contenido el material de los gaviones esta totalmente destruida lo que originó el desalojo del material y con ello la destrucción de los mismos con mayor facilidad.

Características del proceso de erosión: en el sitio donde estuvieron ubicados los gaviones se puede ver que el material sobre el cual

estaba soportada la estructura es de origen aluvial, compuesto en su mayoría por guijarros, gravas y arena, materiales que ante una avenida son altamente erosionables. Con estas condiciones se produjo una socavación en la base de los gaviones, además de la socavación interna en el relleno ocasionada por las aguas del río que al desbordarse formaron una fosa entre el relleno y los gaviones originando su destrucción.

El relleno que conforma la vía fue destruido en su totalidad al quedar sin protección, a la fecha el relleno fue reconstruido pero debido a que quedo sin protección se empiezan a generar procesos de erosión en el talud que conforma la vía Zapatoca.

- Localización: **PR 0 + 450 MURO - 4**
BARRIO LAS MARIAS (margen derecha)

Objeto del muro: muro que actúa como contención del relleno sobre el cual están construidas algunas viviendas en el barrio Las Marías.

Tipo de muro: muro en gaviones, esbelto, con un revestimiento en concreto de 10cm. Los gaviones estaban conformados por una malla de torsión y cantos redondeados en su mayoría y en menor proporción cantos angulosos, cuyo tamaño máximo es de: 40cm y el tamaño mínimo de 7cm.

Dimensiones: este muro tiene una longitud de 8.50m aproximadamente y una altura de 4.40m, compuesto por 3 unidades de 1.0m de altura y una cimentación en concreto ciclópeo de 1.40m de altura.

Cimentación: la cimentación de este muro que es una base en concreto ciclópeo, se encuentra soportada sobre un relleno antrópico, el cual es una mezcla de escombros con material aluvial.

Comportamiento durante el evento de Febrero de 2005: durante el evento del 9 de febrero el relleno sobre el cual estaban construidas algunas de las viviendas del barrio Las Marías, fue socavado por el río, que se desbordó en este sitio; el muro de protección de la ribera solo sufrió abrasión en el revestimiento de los gaviones.

Al estar ubicado el muro en la ribera del río no de manera longitudinal a lo largo de la corriente si no formando un pequeño ángulo con este, hizo que el cauce del río en este sitio estuviese controlado en la margen derecha por el muro el cual soportaba una gran fuerza ejercida por la corriente.

El día 12 de febrero después de haberse socavado parte del relleno sobre el cual estaba apoyado el muro, este quedo en voladizo y se partió, dejando que la fuerza de la corriente socavara el relleno, destruyendo la totalidad de la estructura y permitiendo que las casas que estaban sobre este, se deslizaran.

Características del proceso de erosión: en este sitio se encuentra un relleno de origen antrópico, que por sus características es muy susceptible a la erosión. Las evidencias muestran desalojo de material de relleno en la base del cimiento, esta socavación hizo que parte del cimiento quedara en voladizo.

- Localización: **PR 1 +250 MURO - 5**
TREFILCO (margen derecha)

Objeto del muro: muro que actúa como contención del relleno sobre el cual se hizo la ampliación de las instalaciones de la empresa TREFILCO y como protección contra inundación.

Tipo de muro: muro en gaviones, en el cual se pueden encontrar dos fases de construcción, una nueva en la cual el tipo de gaviones utilizado tiene un revestimiento en concreto de 10cm y están conformados por una malla electro soldada y cantos redondeados. Una segunda etapa del muro muestra un muro en gaviones sin recubrimiento, con malla eslabonada y cantos redondeados. Sobre este muro en gaviones estaba construido un muro divisorio en mampostería que servía de lindero entre la empresa y la ribera del río.

Dimensiones: el muro que tiene recubrimiento tiene una longitud de 15m y una altura de 2.0m, este está compuesto por dos unidades de 1.0m de altura cada uno. En la segunda parte del muro, el que está sin recubrimiento, tiene una longitud de 285m y una altura de 2.0m, en su totalidad el muro tiene una longitud aproximada L: 300m, iniciando en las canchas de fútbol del barrio Arenales y finalizando hasta el inicio del barrio Santa Cruz.

Cimentación: este muro se encuentra soportado sobre una base en concreto ciclópeo de una altura de 60cm aproximadamente.

Comportamiento durante el evento de Febrero de 2005: durante el evento del 9 de febrero de 2005 el muro en mampostería ubicado sobre los gaviones fue destruido en su totalidad por la creciente del río. Durante el mismo evento parte del recubrimiento de los gaviones fue destruido por la abrasión. Durante el evento del 12 de febrero el muro en gaviones no se afectó.

Características del proceso de erosión: los cimientos del muro no presentan evidencias de socavación, el relleno fue bien protegido por este muro y no sufrió pérdida de material.

1.2 SECTOR 2: PARQUE GALLINERAL AL POBLADO

Localización: **PR 2 + 350 MURO - 6**
MALECON (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es proteger de la inundación al sector comercial y los asentamientos poblacionales ubicados en el malecón.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: el muro se extiende por todo el sector del malecón con una longitud de 200m, una altura de 2.20m.

Cimentación: la cimentación de este muro es de concreto ciclópeo y tiene una profundidad de 60cm, y la base sobresale 50cm de la cara del muro.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento, el nivel del agua sobrepaso la altura de muro y arrasó con algunos locales comerciales ubicados en este sector, pero sirvió para que la destrucción de los locales no fuera total. El puente peatonal que comunica el malecón con el gallineral no sufrió daños considerables en esta orilla gracias a la presencia del muro.

Sobre la cara del muro estaban ubicadas dos estructuras que no formaban parte del sistema de protección de la rivera, estas estructuras sobresalían hacia el río y funcionaban como zona turística; una de las estructuras fue destruida por el río y la otra aunque esta en pie presenta socavación en la base. Es de anotar que el muro de protección permanece en pie y actualmente se construye una segunda fase de la estructura que se eleva aproximadamente 3m por encima de la corona del muro existente.

Características del proceso de erosión: debido a que alguna parte del muro esta cimentada sobre material de relleno compuesto en su mayoría por arena y en menor proporción gravas, se presenta socavación en la base del muro de protección. Este proceso de socavación fue el causante de que una de las estructuras colapsara ya que ésta en su totalidad estaba cimentada sobre este material.

- Localización: **PR 2 + 530 MURO - 7**
BATEA (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es conducir las aguas para disminuir los efectos de socavación ocasionados por la contracción junto al estribo de la batea.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: el muro se extiende desde la batea hasta aguas arriba con una longitud de 5m y una altura de 2.0m.

Cimentación: este muro se encuentra cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante este evento la batea actuó como contracción del flujo e hizo que el río se desbordara, e inundara los sectores aledaños a esta. El muro no sufrió daño alguno.

Características del proceso de erosión: el muro que sirve de protección contra socavación de la batea no se socavó.

El material sobre el cual esta cimentado los estribos de la batea, aguas abajo, es de origen aluvial compuesto en su mayoría por cantos redondeados de gran tamaño y en menor proporción guijarros, gravas y arena. Este material se encuentra socavado por debajo del cimiento a una profundidad aproximadamente de 1.0m. En este mismo sitio se evidencia deposición de material fino. Aguas arriba de la batea, se presenta una gran deposición de materiales de diversos tamaños en especial de cantos grandes, debido a que esta actuó como dique.

- Localización: **PR 2 + 530 MURO - 8**
BATEA-PUENTE LENGUERKE (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es proteger de la inundación al sector de el malecón, cumple la función de contener parte del relleno sobre el cual esta ubicada la vía de la calle 27 y protege el estribo del puente Lenguerke.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: el muro se extiende desde la batea hasta el puente Lenguerke, con una longitud de 160m y una altura variable que va de 1.30m al inicio del muro hasta los 6.0m al final del muro.

Cimentación: la base del muro es un cimiento en concreto ciclópeo, que sobresale de la cara del muro 50cm.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante este evento el muro de contención sirvió para que el estribo izquierdo del puente Lenguerke no se socavara, ya que en este punto se presentó una gran contracción generada por el puente.

El muro actuó como control del cauce en la margen izquierda haciendo que el río se desbordara hacia la margen derecha y destruyera algunas viviendas y talleres ubicados sobre esta margen. El muro no sufrió daño alguno.

Características del proceso de erosión: en la base del muro no se presenta socavación, ya que hay gran acumulación de material arrastrado por el río, en especial cantos de gran tamaño que sirvieron de protección. El control lateral que representa este muro para el río hizo que este se desbordara y erosionara gran parte del relleno ubicado en la margen derecha.

- Localización: **PR 2 + 700 MURO - 9**
PUENTE LENGUERKE (margen derecha)

Objeto del muro: muro en gaviones utilizado para proteger contra la socavación al estribo derecho del puente Lenguerke, aguas arriba.

Tipo de muro: muro en gaviones, con canastas en malla de torsión y cantos redondeados, cuyos tamaños son: tamaño máximo: 40cm y tamaño mínimo: 7cm, el cual tiene abundante vegetación como recubrimiento.

Dimensiones: este muro tiene una longitud de 4.0m aproximadamente y una altura de 3m, compuesto por 3 unidades de 1.0m de altura.

Cimentación: los gaviones están cimentados sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento, el muro protegió al estribo derecho del puente Lenguerke contra la socavación. El muro no sufrió daño alguno.

Características del proceso de erosión: la base del muro en gaviones no se vio afectada por socavación, en el sitio se observa que hay una gran deposición de material aluvial, compuesto por arena.

- Localización: **PR 2 + 710** MURO - 10
PROTECCION ESTRIBO (margen derecha)

Objeto del muro: muro en gaviones utilizado para proteger contra la socavación el relleno del barrio Villa Campestre y el estribo derecho del puente Lenguerke, aguas abajo.

Tipo de muro: muro en gaviones, canastas en malla de torsión y cantos redondeados, presenta vegetación como recubrimiento de los gaviones.

Dimensiones: este muro tiene una longitud de 50m aproximadamente y una altura de 3.0m, compuesto por 2 unidades, una de 1.20m de altura y la otra de 1.80m.

Cimentación: los gaviones están cimentados sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento, el muro protegió al estribo derecho del puente Lenguerke contra

la socavación. Aunque el muro no sufrió destrucción total, en las inspecciones visuales se detectaron grietas de tensión en la corona del talud protegida por este muro, estas grietas se presume, son producto de los asentamientos del muro por socavación en la base del mismo.

Características del proceso de erosión: actualmente en la base del muro en gaviones no se evidencian procesos de erosión debido a la gran deposición de material aluvial.

- Localización: **PR 2 + 720** MURO - 11
CASA DE MERCADO (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es conducir las aguas para disminuir los efectos de socavación ocasionados por la contracción junto al estribo del puente, además cumple con la función de contener el relleno sobre el cual esta construida la casa de mercado de Girón.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: el muro se extiende desde el puente Lenguerke hasta la confluencia con la quebrada Las Nieves con una longitud de 140m y una altura de 5.0m.

Cimentación: el muro se encuentra cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento el muro protegió parte del relleno, excepto por una zona en la cual el muro colapsó (aproximadamente 15m de longitud) debido a la fuerza de las aguas. Sobre este muro de contención estaban construidos los muros divisorios en mampostería de la casa de mercado los cuales fueron destruidos en su mayoría, y algunos locales se

encuentran colmatados por la deposición de material transportados por el río.

Características del proceso de erosión: el colapso de una parte del sistema de muros se debió a que este no estaba cimentado al mismo nivel de los otros muros, estaba cimentado sobre un relleno, el cual fue socavado desalojando gran parte del material, quedando el muro sin bases para sostenerse y al quedar en voladizo, colapsó. Esta falla fue causada no solo por la fuerza de las aguas sino por el peso del relleno que estaba sosteniendo el cual al estar saturado tenía un peso mayor que el habitual.

Aguas abajo las bases del muro no fueron socavadas, por el contrario se observa deposición de material aluvial.

- Localización: **PR 2 + 760 MURO - 12**
BARRIO VILLA CAMPESTRE II. (margen derecha)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es la de contener el relleno sobre el cual esta construida la urbanización Villa Campestre II, y de protección contra inundación. Además evita la socavación lateral de la curva en la cual esta ubicado el relleno.

Tipo de muro: muro en gaviones, ancho, con un revestimiento en concreto de 15cm, que protege a los gaviones de la abrasión. Los gaviones estaban conformados por una malla electro soldada y cantos redondeados.

Dimensiones: el muro se extiende a lo largo del barrio hasta 70m antes de la confluencia con el río Frío. Este muro tiene una longitud de 110 m. y una altura de 4.50m, compuesto por 3 unidades de gaviones,

dos de las cuales son de 1.0m de altura y 1.0m de ancho, el tercero tiene una altura de 1.90m y 1.0m de ancho.

Cimentación: el muro en gaviones se encuentra apoyado sobre un cimiento en concreto ciclópeo de 60cm de altura y 2m de ancho, esta cimentación esta proyectada hacia el río con el fin de evitar la socavación del muro.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento aunque el nivel de las aguas superó la altura del muro, la estabilidad de este no se vio afectada.

Características del proceso de erosión: en la base del muro no hay evidencias de socavación y el relleno que está sobre él no presentó pérdida de material.

Gracias a que los gaviones están recubiertos, estos no evidencian abrasión superficial, a pesar que gran parte del material arrastrado por el río golpeaba con gran fuerza esta curva.

- Localización: **PR 3 + 150 MURO - 13**
URBANIZACION CASTILLA REAL (margen derecha)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es conducir las aguas para disminuir los efectos de erosión en la curva.

Tipo de muro: muro en gaviones con un revestimiento en concreto de 15cm, que protege a los gaviones de la abrasión.

Dimensiones: el muro tiene una longitud de 40m y una altura de 2m, y está conformado por dos unidades de gaviones cada una de 1.0m de

altura y 1.0m de ancho. En la parte posterior del muro se encuentra un filtro compuesto por cantos redondeados.

Cimentación: los gaviones se encuentra apoyados sobre un cimiento en concreto ciclópeo, el cual está proyectado hacia el río, con un ancho de 1.0m, con el fin de evitar la socavación.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante la inundación el nivel de las aguas superó la altura del muro e inundó parte de la urbanización, sin poner en riesgo la estabilidad del muro.

Características del proceso de erosión: las bases del muro no presentan evidencias de socavación y no hubo pérdida de material de relleno gracias al filtro que está en la parte posterior del muro.

- Localización: **PR 3 + 350 MURO - 14**
BARRIO EL POBLADO (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral cuya función es conducir las aguas para disminuir los efectos de erosión en la curva.

Tipo de muro: muro en gaviones, con un revestimiento en concreto de 15cm, que protege a los gaviones de la abrasión. Los gaviones se encuentran conformados por una malla de torsión y cantos redondeados.

Dimensiones: el muro tiene una longitud de 60m, y una altura de 2.0m.

Cimentación: el muro se encuentra cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento, el nivel de las aguas superó la altura del muro sin que se viese afectada su estabilidad.

Este muro actuó como un control lateral del cauce, haciendo que el río se recostara sobre la margen derecha.

Características del proceso de erosión: las bases del muro no presentan evidencias de socavación, por el contrario se presenta acumulación de material aluvial en el pie del muro.

El relleno que se encuentra detrás del muro tampoco presenta pérdida de material.

- Localización: **PR 3 + 500 MURO - 15**
ENTREGA QUEBRADA PADRE JESUS (margen izquierda)

Objeto del muro: muro cuya función es proteger las obras de entrega de la quebrada Padre Jesús y parte del barrio La Isla, además tiene la función de contener parte del relleno sobre el cual está construido este barrio.

Tipo de muro: muro en gaviones, con un revestimiento en concreto de 15cm, que protege a los gaviones de la abrasión. Estos están conformados por malla electro soldada y cantos redondeados. El sistema de muros está conformado por una primera parte que protege la entrega del canal y una segunda parte en la que el muro contiene parte del relleno del barrio La Isla. Estas dos partes están separadas por una junta.

Dimensiones: el muro de protección de la entrega tiene una longitud de 30m hacia aguas arriba y 3.0m hacia aguas abajo y una altura de 3.0m.

Desde la junta hacia aguas abajo se encuentra el muro de contención con una longitud de 40m y una altura de 3.0m.

Cimentación: el sistema de muros en gaviones se encuentra soportado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento los muros de protección de la entrega evitaron la destrucción de algunas viviendas ubicadas cerca del sitio, pero actuaron como una contracción ya que el canal se proyecta al río en una longitud de 4.0m aproximadamente, lo que ayudó al represamiento del río.

El día 9 de febrero el relleno fue destruido junto con algunas de las viviendas, este material se depositó encima del muro que aún permanecía en pie, en la madrugada del día 12 parte (aproximadamente 10m de la longitud de la estructura) del muro de contención del relleno, colapsó, aumentando el número de viviendas afectadas.

Características del proceso de erosión: en el sitio se observa la destrucción del relleno y se generaron procesos de erosión que afectan la estabilidad de las viviendas que no fueron afectadas durante el evento. Se observa socavación en la base del muro, que posiblemente fue la que provocó el colapso de este, la socavación en esta parte del muro es mayor debido a que se encuentra ubicado sobre una curva.

- Localización: **PR 3 + 730 MURO - 16**
BARRIO EL CARMEN (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral, cuya función es proteger de la inundación a los habitantes del barrio El Carmen.

Tipo de muro: muro en gaviones, con un revestimiento en concreto de 10cm, que protege a los gaviones de la abrasión. Estos están conformados por malla electro soldada recubierta de PVC y cantos redondeados.

Dimensiones: el muro en gaviones tiene una longitud de 105m, y una altura de 6.20m, conformado por tres unidades de gaviones dos de las cuales tienen una altura de 2.5m y 1.20m de ancho, la tercera unidad tiene una altura de 1.20m y un ancho de 1.0m.

Cimentación: el muro se encuentra cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento el nivel de las aguas sobrepasó la altura del muro inundando las viviendas que se encuentran ubicadas detrás de este y aunque gran parte del barrio se inundó, esta estructura sirvió para evitar la destrucción total de las viviendas.

Teniendo en cuenta la dinámica del río y el comportamiento de éste durante el evento vemos que el muro actuó como control lateral del río desviándolo hacia la margen derecha y aumentando con esto la destrucción. Debido a esto se vieron afectados algunos parqueaderos y talleres ubicados aguas abajo sobre la margen derecha.

Hidráulicamente esa estructura es una contracción para el río en este sitio que hace que este se desborde hacia la margen derecha.

Características del proceso de erosión: en el pie del muro no se presentó socavación ni se afectó la estabilidad del mismo.

1.3 SECTOR 3: EL POBLADO A SACEITES

- Localización: **PR 4 + 660 MURO - 17**
COLEGIO JOSE ALEJANDRO PERALTA (margen izquierda)

Objeto del muro: muro lateral, cuya función es proteger de la inundación al colegio José Alejandro Peralta y proteger la curva (en la cual ésta ubicado) de la erosión. Además sirve de protección del canal de entrega de la quebrada La Macana.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo.

Dimensiones: su longitud es de 55m y una altura de 2.50m, él cual se localiza en la curva sobre la cual esta ubicado el colegio, y termina en la confluencia con la quebrada La Macana.

Cimentación: el muro de protección está cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: el nivel de las aguas superó la altura del muro inundando todo el colegio y gran parte del barrio El Poblado.

Parte del canal de entrega de la quebrada La Macana colapsó, debido a que gran parte del material transportado por el río golpeaba la estructura en este sitio.

Características del proceso de erosión: el muro no presentó procesos de socavación en la base, se presenta gran acumulación de material aluvial aguas abajo de la entrega.

- Localización: **PR 4 + 880 MURO - 18**
PUENTE PALENQUE (margen derecha)

Objeto del muro: muro en gaviones, esbelto, utilizado para proteger contra la socavación al estribo derecho del puente Palenque, aguas abajo.

Tipo de muro: muro en gaviones, estos están conformados por malla electro soldada y cantos redondeados.

Dimensiones: el muro tiene una longitud de 15m y una altura de 8.0m, conformado por 5 unidades de gaviones cada una de 1.20m de altura.

Cimentación: los gaviones se encuentra soportados sobre un cimiento en concreto ciclópeo, el cual tiene una altura de 2.0m y su base se proyecta hacia el río 1.0m, esto con el fin de evitar la socavación. El cimiento se encuentra soportado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: el muro en gaviones evitó la socavación del estribo, pero fue destruido casi en su totalidad.

Características del proceso de erosión: el colapso del muro se debió a que el material sobre el cual estaba apoyado el cimiento fue socavado. La socavación que se presentó en el evento afectó no solo el muro sino a todo el relleno sobre el cual están construidos algunos talleres.

En el sitio se pueden observar tres fases de construcción de este muro, la mas antigua se encuentra más metida en el relleno que las otras dos, la segunda fase del muro fue la que el río destruyó en el evento de febrero de 2005, y actualmente se construye un nuevo muro en

gaviones con la característica de ser mas rígido debido al tipo de materiales utilizados (malla de torsión y cantos angulosos), y ésta ubicado mas cerca a la ribera del río que los otro dos.

- Localización: **PR 4 + 895 MURO - 19**
PUENTE PALENQUE (margen derecha)

Objeto del muro: muro en gaviones, esbelto, utilizado para contener el relleno sobre el cual están construidos algunos de los talleres del sector de palenque. Además sirve de protección contra inundación.

Tipo de muro: muro en gaviones, conformados por malla electro soldada y cantos redondeados.

Dimensiones: el muro se extiende a lo largo del relleno con una longitud de 100m aproximadamente, y una altura de 5.0m. Sobre los gaviones estaba construido un muro en sacos de arena el cual se encargaba de contener parte del relleno.

Cimentación: el muro estaba cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento el muro fue destruido en su totalidad.

Características del proceso de erosión: la base del muro en gaviones fue socavada lo que originó el colapso del muro y el deslizamiento del relleno.

La socavación en este muro se debió a erosión lateral ya que la profundización en el fondo del cauce estaba controlada por la formación órganos, además a la aceleración del flujo ocasionada por la contracción que genera el puente.

- Localización: **PR 4 + 850 MURO - 20**
PUENTE PALENQUE (margen derecha)

Objeto del muro: muro utilizado para contener el relleno sobre el cual están construidos algunos de los talleres del sector de Palenque. Además sirve de protección contra la socavación del estribo derecho aguas arriba.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo, que corresponde al estribo derecho del antiguo puente metálico.

Dimensiones: longitud de 30m y altura de 6.0m.

Cimentación: aunque en este punto es en donde aflora la formación órganos, el muro esta cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento el muro colapsó destruyendo el relleno y los talleres que estaban ubicados en este sitio.

Características del proceso de erosión: debido a la contracción generada en este sitio por el puente se presentó socavación en la base del muro y posteriormente se produjo el colapso.

- Localización: **PR 4 + 880 MURO - 21**
PUENTE PALENQUE (margen izquierda)

Objeto del muro: muro de protección contra inundación de las viviendas ubicadas en la ribera del río, y actualmente sirve de protección al colector de aguas negras ubicado cerca al barrio San Antonio del Carrizal.

Tipo de muro: muro en concreto ciclópeo

Dimensiones: longitud 15m y altura de 2.0m

Cimentación: la estructura se encuentra cimentada sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante este evento el nivel de las aguas superó la altura del muro y arrasó con algunas de las viviendas ubicadas en la rivera, la estabilidad del muro no se afectó.

Características del proceso de erosión: en algunas partes la base del muro se encuentra socavada y en otras hay grandes depósitos aluviales y material de relleno que la protegen.

- Localización: **PR 5 + 00** MURO - 22
BARRIO SAN ANTONIO DEL CARRIZAL (margen izquierda)

Objeto del muro: muros de protección de entrega de aguas negras y muros de contención de rellenos.

Tipo de muro: muros en gaviones, con un revestimiento en concreto de 10cm, que protege a los gaviones de la abrasión. Estos están conformados por malla electro soldada y cantos redondeados. Sobre la rivera se encuentran 5 muros de protección de entrega de aguas negras y 1 muro de contención de relleno.

Cimentación: algunos muros se encuentran cimentados sobre material aluvial, otros sobre rellenos y los demás en la formación órganos.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento la estructura que contenía parte del relleno sobre el cual se encuentran construidos algunos parqueaderos del sector, no colapsó, pero el relleno presenta problemas de erosión.

Las estructuras de entrega algunas colapsaron, otras permanecen en pie y otras presentan problemas de socavación en la cimentación.

Características del proceso de erosión: se presentan problemas de erosión lateral en el relleno que bordea gran parte del barrio y en algunas estructuras el material desalojado ha sido remplazado por material aluvial que se ha depositado después del evento.

De las 6 estructuras en gaviones que se encontraban en la ribera del río 3 se socavaron debido a que estaban cimentadas sobre material aluvial o sobre rellenos de origen antrópico, las otras 3 estructuras no presentan problemas de socavación ya que estaban cimentados sobre la formación órganos.

Los problemas de socavación y erosión se deben a erosión lateral ya que la profundización en el fondo del cauce estaba controlada por la formación órganos.

1.4 SECTOR 4: SACEITES A PARQUE INDUSTRIAL 1

- Localización: **PR 7 + 350 MURO - 23**
BARRIO JOSE A. GALAN (margen derecha)

Objeto del muro: muro en gaviones, utilizado para proteger de la inundación a los habitantes de los barrios José A. Galán, Carlos Pizarro y 5 de Enero.

Tipo de muro: muro en gaviones, conformados por malla de torsión y cantos redondeados.

Dimensiones: el muro se extiende a lo largo de estos barrios con una longitud de 370m aproximadamente, y una altura de 2.40m, conformado por dos unidades de gaviones cada una de 1.20m de altura, una de las cuales esta proyectada hacia el río con el fin de evitar la socavación en la base.

Cimentación: el muro estaba cimentado sobre material aluvial.

Comportamiento durante el evento de febrero de 2005: durante el evento el nivel de las aguas superó la altura de la estructura y se produjo la destrucción de un gran número de viviendas ubicadas cerca al río y la inundación de muchas otras.

Actualmente se pueden distinguir tres tramos del muro, uno en el que el muro fue destruido en su totalidad en una longitud de 80m, un segundo tramo en el que parte del muro esta destruido y sepultado por deposición de material transportado por el río en una longitud de 200m y una tercera en la que el muro permanece en pie sin deposición de material en una longitud de 90m.

Características del proceso de erosión: la inspección visual de los tramos 1 y 2 del muro se imposibilitó dada la gran cantidad de material aluvial depositado sobre la estructura; en el sitio de el tramo 3 no se presentaron procesos de erosión que afectaran la estabilidad del muro, se encuentra grandes depósitos aluviales y materiales de relleno sobre la base del muro en algunos sectores.

2 SOCAVACION GENERAL

En este capítulo se presenta una extracción del libro Introduction to River Engineering del Dr. José A. Maza [2] en el cual se exponen los conceptos básicos y la metodología para estimar profundidades de socavación en ríos, siguiendo el método de Lischtván-Lebediev.

Se decidió utilizar el método de Lischtván-Lebediev modificado por Maza, una vez se corroboró la no aplicabilidad de las teorías de Laursen [3], BW. Melville, Froehlich, las propuestas en la publicación No. FHWA NHI 01-003, Hydraulic Engineering Circular No. 23, [3] con las cuales se obtuvieron profundidades de socavación muy altas y no consistentes con las observadas tras el evento de febrero de 2005.

Sin embargo al final de este capítulo se presenta a manera de comparativo, los resultados de las estimaciones de profundidad de socavación, utilizando la teoría de Laursen, con lo cual se corrobora lo ya expuesto en párrafo anterior.

2.1 MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV MODIFICADO POR MAZA

El conocer el descenso del nivel del fondo de un río, producido por la erosión general, es de importancia, por ejemplo, cuando se diseñan obras como puentes o cuando se desea atravesar un río con un acueducto o cualquier tubería colocada bajo el fondo. Al descender el nivel del fondo, como consecuencia de la erosión general, llegan a quedar al descubierto capas del subsuelo con otros materiales. Ello dependerá tanto de la estratigrafía del subsuelo como de la magnitud del caudal de diseño para el cual se desee obtener el probable

descenso del nivel del fondo. Debido al hecho que el más usual de estos trabajos son los puentes, el procedimiento de cálculo expuesto a continuación incluye todos los parámetros y coeficientes en una sección de un puente.

Si el caudal de diseño está asociado a un período de retorno bajo, por ejemplo diez a veinticinco años, es frecuente sólo encontrar un material, pero cuando el período de retorno es muy alto, cien años o más, con frecuencia se descubren y erosionan estratos con material distinto al que forma el fondo inicial del cauce.

Para este proceso, la aplicación del método de Lischtván-Lebediev es recomendado porque determina la condición de equilibrio de flujo entre la velocidad de flujo media y la velocidad media requerida para erosionar un material de una densidad y diámetro dados. Este método se aplica si la distribución del material del subsuelo es homogénea o heterogénea. La distribución del material del subsuelo es considerado homogéneo cuando éste es un único tipo de material en toda la profundidad producida por la socavación general.

Este es heterogéneo cuando más de un material se encuentra en la profundidad alcanzada por la socavación.

La condición general de equilibrio esta dada por:

$$U_r = U_e \quad (2.1)$$

Donde

U_r = velocidad media del flujo, (real) m/s

U_e = velocidad media necesaria para que el flujo erosione el material del lecho, m/s

Para aplicar el método propuesto, los datos siguientes son requeridos cuando la socavación general es calculada en una sección de río:

- a. Caudal máximo de diseño Q_d y periodo de retorno.
- b. Nivel de agua del caudal de diseño en la sección transversal estudiada.
- c. Sección transversal del río o sección antes estudiada obtenida durante la reciente estación seca.
- d. Estratigrafía de los materiales bajo el lecho.

- e. Si el suelo no es cohesivo, la distribución de tamaños de las partículas o granulometría, es requerida.
- f. Si el suelo es cohesivo, el peso específico seco γ_d de una muestra es obtenido dividiendo el peso de la muestra seca entre el volumen no alterado que tenía cuando fue tomada.

2.1.1 Cálculo de U_r

La hipótesis básica del método es que una descarga unitaria pasando por un ancho unitario de una sección, permanece constante durante el proceso de erosión.

La variación en la velocidad media de flujo U_r es función de la profundidad y para cada uno de los puntos de la sección puede obtenerse el análisis de una franja vertical de la sección transversal.

Según Manning el flujo a través de una sección de anchura ΔB y profundidad d_o es

$$\Delta Q = U \Delta A = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} d_o^{\frac{5}{3}} \Delta B \quad (2.2)$$

Donde S es el gradiente hidráulico. Para una rugosidad (n) constante, para toda la sección se considera que $(1/n)S^{1/2}$ es constante para cualquier punto y se conoce como α .

$$\Delta Q = \alpha d_o^{\frac{5}{3}} \Delta B \quad (2.3)$$

El valor de α puede expresarse en forma general como función de la profundidad media antes de la socavación d_m , la velocidad media en la sección U_r , y el caudal de diseño, así:

$$Q_d = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} d_m^{\frac{5}{3}} B_e \quad (2.4)$$

Si el flujo causa turbulencia cerca de pilas y estribos, es necesario modificar la ecuación anterior, por un coeficiente de contracción μ ,

$$Q_d = \frac{\mu}{n} S^{\frac{1}{2}} d_m^{\frac{5}{3}} B_e \quad (2.5)$$

$$Q_d = \mu \alpha d_m^{\frac{5}{3}} B_e \quad (2.6)$$

Donde

$$\alpha = \frac{Q_d}{\mu d_m^{\frac{5}{3}} B_e} \quad (2.7)$$

Ahora, en la franja bajo estudio, cuando d_o incrementa a algún valor d_s , la velocidad disminuye a un nuevo valor U_r , y Q en la franja de espesor ΔB es expresado como función de la velocidad y profundidad como sigue:

$$\Delta Q = U_r d_s \Delta B \quad (2.8)$$

Sustituyendo la eq. 2.8 en la ecuación 2.3

$$U_r d_s \Delta B = \alpha d_o^{\frac{5}{3}} \Delta B \quad (2.9)$$

De donde la velocidad de flujo real puede derivarse

$$U_r = \frac{\alpha d_o^{\frac{5}{3}}}{d_s} \quad (2.10)$$

En las ecuaciones 2.1 a 2.10 el significado de las variables es el siguiente:

Q_d = caudal de diseño en m^3/s

d_o = altura inicial existente en una determinada línea vertical de la sección entre el nivel de agua cuando el flujo pasa y el nivel del fondo registrado durante el periodo seco, en m.

d_s = altura después de la socavación del lecho. Esta es medida desde el nivel de agua cuando un caudal pasa al nivel del fondo erosionado.

α = coeficiente deducido de los datos de mano.

d_m = altura media del canal como resultado de dividir el área hidráulica por el ancho efectivo, en m

$$d_m = \frac{A}{B_e} \quad (2.11)$$

A = área hidráulica. Esta es obtenida entre la sección transversal original del río y la superficie libre asociada con la descarga de diseño.

μ = coeficiente que tiene en cuenta las contracciones de flujo lateral producido en las caras de todos los obstáculos existentes dentro del flujo, por ejemplo las pilas de un puente. Este es determinado mediante la expresión propuesta por Maza considerando el valor dado por Lischtvan-Lebediev. Este no tiene unidades.

$$\mu = 1 - \frac{0.387 U_o}{L} \quad (2.12)$$

Cuando no hay ningún obstáculo, $\mu=1$

En la ecuación (1.12), U_0 es la velocidad media en la sección, en m/s, dado por la relación:

$$U_0 = \frac{Q_d}{A} \quad (2.13)$$

Siendo L la distancia entre dos pilas u obstáculos, en m.

B_e : ancho efectivo del canal, en m. Este es obtenido del ancho real del canal menos todo el ancho de los obstáculos. Para calcular B_e , todos los espacios libres limitados por los obstáculos son proyectados en un plano perpendicular a la dirección del flujo. Generalmente todos los obstáculos son pilas o estribos. Cuando no hay obstáculos en el canal B_e es igual al ancho del río.

Cuando la socavación general que afecta un puente es calculado, el ancho efectivo puede ser encontrado analíticamente con la siguiente expresión.

$$B_e = (B - \sum b_i) \cos \phi - (c + 1 - N) a \sin \phi \quad (2.14)$$

Donde

B = tramo total de puente, o de uno de sus extensiones bajo estudio, en m.

a = longitud de pilas.

$\sum b_i$ = suma de los anchos de las pilas, en el tramo B , en m.

c = número de las pilas y caras de los estribos dentro de los límites de B .

N = número de pilas o estribos tenidos en cuenta al considerar c .

Φ = Angulo formado por la dirección del flujo y el eje longitudinal de las pilas.

Recuérdese la importancia de tener, en una sección de puente, el flujo paralelo al eje más grande de la pila, por otra parte, que la anchura del cauce eficaz se reducirá considerablemente.

Para obtener U_r , la condición establece que las descargas unitarias permanezcan constantes durante todo el proceso de socavación, es decir, que el

ancho de la sección no varia, por consiguiente, que las reducciones de velocidad serán únicamente debido al incremento de área producido por el descenso del lecho.

Este punto es una de las debilidades del método, ya que para que la condición establecida se cumpla, todos los tramos a lo ancho de la sección deben oponer una resistencia similar a ser erosionados, y lo mismo puede decirse de los materiales del subsuelo a medida que son descubiertos. Dos simples ejemplos pueden mencionarse cuando esta condición no se cumple. Primero, suponga que el canal principal es cubierto por vegetación, excepto en donde la velocidad del agua es baja. Cuando el flujo viene a gran velocidad y alcanza la zona vulnerable que no ésta cubierta por vegetación, entonces, socavará más rápidamente y una descarga más grande tendera a pasar a través de esta. Como segundo ejemplo, puede que una sección tenga una parte del lecho en arcilla y otra con arena. Cundo el flujo viene, la socavación será mayor en la zona arenosa, porque la arcilla necesita un tiempo mayor de exposición para erosionarse.

Sin embargo, cuando algo similar sucede, se sabe que habrá mayor socavación como ya se ha dicho, aun cuando no es posible calcular exactamente la socavación general, por lo menos se reconocerá donde es mayor. El primer ejemplo tiene una solución aproximada, como se muestra en 2.1.5.

El primer ejemplo tiene el propósito de mostrar la importancia de no tener la vegetación a todo lo ancho del cauce principal o en la zona cerca de un puente o un cruce de la tubería. Con esto la erosión general se distribuye por todo lo ancho del cauce, y no únicamente concentrándose en zonas sin vegetación.

2.1.2 Calculo de U_e .

La velocidad mínima necesaria para mover el material del lecho, depende de la naturaleza de los materiales del lecho y de la composición del subsuelo. Tomando en cuenta los datos de Lischvan-Levediev, Maza formula la siguiente expresión:

Para suelos no cohesivos o granulares.

Si $0.00005 \text{ m} \leq D_{84} \leq 0.0026 \text{ m}$.

$$U_e = 4.7 \beta D_{84}^{0.28} d_s^{\left(\frac{0.322}{D_{84}^{0.03}}\right)} \quad (2.15)$$

Si $0.0026 \text{ m} \leq D_{84} \leq 0.182 \text{ m}$.

$$U_e = 4.7 \beta D_{84}^{0.28} d_s^{\left(\frac{0.223}{D_{84}^{0.092}}\right)} \quad (2.16)$$

Si $0.182 \text{ m} \leq D_{84} \leq 1.0 \text{ m}$.

$$U_e = 4.7 \beta D_{84}^{0.28} d_s^{\left(\frac{0.191}{D_{84}^{0.187}}\right)} \quad (2.17)$$

Para suelos cohesivos

$$U_e = 0.000173 \beta \gamma_d^{1.18} d_s^{\frac{66.28}{\gamma_d^{0.725}}} \quad (2.18)$$

U_e , la velocidad de flujo, calculada con las ecuaciones 2.15 y 2.16, solo requiere un pequeño aumento para empezar el transporte de la partícula.

En la ecuación (2.18), γ_d es el peso específico seco, que es igual al peso seco dividido por el volumen original, en kg/m^3 .

En la ecuación previa, β es un coeficiente que toma en cuenta el periodo de retorno T de la descarga de diseño. Para encontrar su valor se propone siguiente la expresión:

$$\beta = 0.8416 + 0.03342L_n T \quad (2.19)$$

Que es valida para periodo de retorno entre 15 y 1500 años. (sin unidades).

2.1.3 Calculo de socavación (d_s) para suelos homogéneos.

Una vez el tipo de suelo en el sitio es conocido, y asumiendo que la rugosidad es constante para toda la sección, la altura de socavación es obtenida haciendo U_e y U_r iguales. Así, se obtiene la siguiente ecuación:

Para suelos granulares, usando las ecuaciones 2.10 y 2.15

$$d_s = \left| \frac{\alpha d_o^{5/3}}{4.7 \beta D_{84}^{0.28}} \right| \left| \frac{D_{84}^{0.03}}{0.322 + D_{84}^{0.03}} \right| \quad (2.20)$$

Usando las ecuaciones 2.1. Y 2.16

$$d_s = \left| \frac{\alpha d_o^{5/3}}{4.7 \beta D_{84}^{0.28}} \right| \left| \frac{D_{84}^{0.092}}{0.223 + D_{84}^{0.092}} \right| \quad (2.21)$$

Y finalmente usando la ecuación 2.10 y 2.17.

$$d_s = \left| \frac{\alpha d_o^{5/3}}{4.7 \beta D_{84}^{0.28}} \right| \left| \frac{D_{84}^{0.187}}{0.191 + D_{84}^{0.187}} \right| \quad (2.22)$$

Para suelos cohesivos, usando las ecuaciones 2.10 y 2.18

$$d_s = \left| \frac{5780 \alpha d_o^{5/3}}{\beta \gamma_d^{1.18}} \right| \left| \frac{\gamma_d^{0.725}}{66.28 + \gamma_d^{0.725}} \right| \quad (2.23)$$

Las ecuaciones 2.20 y 2.23 son usadas para todas las secciones con rugosidad uniforme y debe ser aplicada en varias líneas verticales de una sección. En cada

uno de estos una altura d_s es obtenida como función de una profundidad inicial d_o . Para encontrar el resultado final se unen los puntos para encontrar el perfil teórico de la sección socavada.

2.1.4 Cálculo de socavación (d_s) para suelos heterogéneos.

Los suelos heterogéneos están compuestos por dos o más materiales y se encuentra en capas. Estos probablemente consisten en la mezcla de algunos estratos cohesivos y otros no cohesivos, en diferentes distribuciones.

A veces solo materiales no cohesivos se encuentran, siendo la diferencia en los diámetros, densidades, etc. No importa el tipo de estratificación, la profundidad de equilibrio puede obtenerse analíticamente por tanteos o un método semigráfico.

a. Analítico por tanteos

Si la distribución estratificada de los materiales bajo una línea vertical está disponible, podemos escoger la capa superior y de acuerdo con la naturaleza del material, las ecuaciones 2.20 a 2.23 pueden ser aplicadas.

Si los resultados de la altura d_s están bajo la primera capa, el segundo estrato será escogido y el ensayo es repetido con la ecuación que corresponda al tipo de suelo del segundo estrato y así sucesivamente, en el primer ensayo dónde las profundidades calculadas están dentro del estrato bajo el estudio, el d_s investigado se ha encontrado. Estos cálculos deben hacerse en orden, esto es, empezando de la cima del estrato bajando al más profundo.

Cuando el d_s calculado esta por encima del estrato bajo consideración, la profundidad de erosión a ser escogida es el limite superior de ese estrato.

En todos los ensayos, d_o es el mismo.

b. Método semigráfico.

Considerando un punto P_i a una profundidad inicial, en la que sus características geológicas son conocidas. Una vez que las profundidades de los límites de los diferentes estratos son conocidos, U_e , se puede calcular usando las ecuaciones 2.15 a 2.18 y los límites entre ellos para cada estrato. Seguido, el valor de U_r es determinado con la ecuación 2.10 para varias profundidades escogidas arbitrariamente.

Después de este paso, los valores son graficados en un sistema de ejes coordenados, con la velocidad en el eje horizontal y la profundidad d_s a lo largo del vertical. Entonces las curvas para U_e y U_r son obtenidas. Los puntos de intersección muestran la profundidad de equilibrio para socavación y la velocidad media correspondiente.

2.1.5 Socavación general calculada cuando la rugosidad no es uniforme en la sección.

Cuando en una sección hay dos anchos o más zonas que tienen diferentes rugosidades, el procedimiento de cálculo es similar a cálculos anteriores. La única diferencia radica en el hecho que los cálculos tienen que ser realizados para una zona con rugosidad común, porque el α correspondiente a cada una tiene que ser encontrado.

$$\alpha_i = \frac{Q_{di}}{d_m^{5/3} B_{ei} \mu_i} \quad (2.24)$$

En la ecuación (2.24) el subíndice i está dado con las variables referidas al valor de cada variable para cada división de la sección transversal bajo estudio. Para valorar el flujo de descarga que pasa a través de una zona, es usada la siguiente ecuación

$$Q_{di} = \frac{Q_d A_{ei} C_i \sqrt{d_i}}{\sum_{i=1}^n (A_{ei} C_i \sqrt{d_i})} \quad (2.25)$$

Donde:

Q_{di} =descarga corriendo a través de cada zona, en m^3/s

A_{ei} =área hidráulica actual antes de la erosión en el tramo estudiado, esto es, área hidráulica total menos el área de de las proyecciones de los obstáculos en un plano perpendicular al flujo, en m^2 .

Q_d =descarga total de diseño, en m^3/s

C_i =coeficiente de rugosidad de chezy en cada zona o tramo. Calculado con la siguiente ecuación

$$C_i = \frac{d_i^{1/6}}{n_i} \quad (2.26)$$

o usando otra ecuación equivalente.

d_i =profundidad media en cada una de las zonas consideradas, en m.

n_i =coeficiente de rugosidad de Manning en cada una de las zonas.

2.1.6 Efectos sobre la socavación cuando el flujo transporta bastante sedimento en suspensión

Cuando debido a las características de la cuenca, el flujo transporta gran cantidad de material fino en suspensión principalmente carga de lavado, la profundidad de la erosión general del lecho se reduce. Esto sucede porque cierta cantidad de energía es necesaria para mantener ese material en suspensión y llevarlo. Cuando el sedimento en suspensión se incrementa, la viscosidad y el peso específico γ_m de la mezcla agua-sedimento también se incrementa; estos factores tienden a reducir la turbulencia del flujo. Por consiguiente, para obtener el mismo grado de socavación que se tiene con agua clara, la velocidad media debe aumentarse. Esto es obtenido introduciendo en las ecuaciones 2.15 a 2.18

el coeficiente ψ , que depende del peso específico de la mezcla agua-sedimento. Con esto, la mencionada ecuación toma la forma de la ecuación 2.15

$$U_e = 4.7 \beta \psi D_{84}^{0.28} d_s^{\left(\frac{0.322}{D_{84}^{0.03}}\right)} \quad (2.27)$$

De la ecuación 2.16

$$U_e = 4.7 \beta \psi D_{84}^{0.28} d_s^{\left(\frac{0.223}{D_{84}^{0.092}}\right)} \quad (2.28)$$

De la ecuación 2.17

$$U_e = 4.7 \beta \psi D_{84}^{0.28} d_s^{\left(\frac{0.191}{D_{84}^{0.187}}\right)} \quad (2.29)$$

Para suelos cohesivos, usando la ecuación 2.18

$$U_e = 0.000173 \beta \psi \gamma_d^{1.18} d_s^{\frac{66.28}{\gamma_d^{0.725}}} \quad (2.30)$$

Para obtener el coeficiente ψ . La siguiente expresión es propuesta. Fue obtenida con los datos de Lischtvan-Levediev.

$$\psi = 0.38 + 0.618 \left(\frac{\gamma_m}{1000}\right)^2 \quad (2.31)$$

$$\psi = 0.38 + \left(\frac{\gamma_m}{1272}\right)^2 \quad (2.32)$$

Donde γ_m es el peso específico de la mezcla agua-sedimento, en kgf/m^3 . Además, deben respetarse las siguientes unidades: U_e en m/s ; D_{84} en m ; α en $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ y β y ψ adimensional.

Con esto, la profundidad de la erosión general para materiales no cohesivos es obtenida con las siguientes expresiones:

Si $0.00005 \text{ m} \leq D_{84} \leq 0.0026 \text{ m}$.

$$d_s = \left(\frac{\alpha d_0^{5/3}}{4.7 \beta \psi D_{84}^{0.28}} \right)^{\frac{D_{84}^{0.03}}{0.322 + D_{84}^{0.03}}} \quad (2.33)$$

Si $0.0026 \text{ m} \leq D_{84} \leq 0.182 \text{ m}$.

$$d_s = \left(\frac{\alpha d_0^{5/3}}{4.7 \beta \psi D_{84}^{0.28}} \right)^{\frac{D_{84}^{0.092}}{0.223 + D_{84}^{0.092}}} \quad (2.34)$$

Si $0.182 \text{ m} \leq D_{84} \leq 1.0 \text{ m}$.

$$d_s = \left(\frac{\alpha d_0^{5/3}}{4.7 \beta \psi D_{84}^{0.28}} \right)^{\frac{D_{84}^{0.187}}{0.191 + D_{84}^{0.187}}} \quad (2.35)$$

Y para materiales cohesivos

$$d_s = \left(\frac{5780 \alpha d_0^{5/3}}{\beta \psi \gamma_d^{1.18}} \right)^{\frac{\gamma_d^{0.725}}{66.28 + \gamma_d^{0.725}}} \quad (2.36)$$

2.1.7. Conclusiones y recomendaciones de MAZA.

Con este método no solo el valor de socavación general en una sección a lo largo del río puede calcularse, también la socavación debido a contracciones en aquellas secciones donde el área ha sido reducida.

Ya ha sido mencionado que el método propuesto requiere datos relativamente fáciles:

- a. La descarga de diseño relacionada al periodo de retorno.

- b. Las secciones transversales del río tomadas cuando no hay erosión, es decir cuando el flujo de las descargas es pequeño.
- c. La estratigrafía del material del lecho de la sección bajo estudio.
- d. El peso específico seco de los materiales cohesivos y la curva granulométrica de los no cohesivos. En el último caso el peso específico de las partículas es asumido para ser igual a 2650 kgf/m^3 .
- e. La dirección del flujo en la sección transversal.
- f. La geometría de los obstáculos o puentes, incluyendo pilas y estribos.
- g. Para una sección compuesta con diferentes rugosidades, además de la geometría total de la sección, el ancho y rugosidad de cada tramo debe conocerse.
- h. Peso específico de la mezcla de agua-sedimento durante el flujo, este dato es el más difícil de obtener cuando no hay una estación del aforo cerca del sitio estudiado.

La hipótesis fundamental es que el flujo por unidad de ancho permanece constante durante todo el proceso de socavación para cada franja escogida, descartando la posible existencia de un flujo transversal. Esto es siempre verdadero, excepto en el caso de partes exteriores del lecho. Cuando trabajamos con puentes los estribos no se permiten desplazamientos laterales.

Cuando consideramos la hipótesis básica de la conservación del flujo unitario, un inconveniente puede surgir relacionado al hecho que el material del lecho de una región puede ser más resistente a socavación que el resto de la sección.

En la región con menor resistencia, el lecho bajara más rápidamente. El resultado será que después de algún tiempo el flujo unitario aumentara aquí y disminuirá en la región donde el material es más resistente. A un material menos resistente corresponde las profundidades mayores que las estimadas, mientras el material sea más resistente más pequeñas serán estas.

Teniendo en cuenta la resistencia del material, ninguna consideración se dio al tiempo necesitado para socavar un lugar en particular.

El valor teórico calculado para socavación puede ser fácilmente alcanzado si el material es no cohesivo; sin embargo, para materiales cohesivos un cierto tiempo es requerido para que el flujo haga su trabajo, que puede ser más largo que la duración del flujo. Debido a esto, la socavación puede ser más pequeña que la calculada para estos materiales, incluso si este puede tener una gran capacidad de socavación es fácil evaluar el grado de exactitud de la formula propuesta y el criterio porque estos solo han sido aplicados en algunos casos y, sobre todo, porque ninguna observación ha sido recientemente hecha en puentes construidos.

No es posible declarar con precisión el método expuesto porque se hicieron pocas observaciones en el campo. Estas han mostrado que las profundidades reales medidas son entre 5 y 12% más pequeñas que las teóricas. Esto fue asignado al hecho que los cálculos teóricos se hicieron con el diámetro medio - como Lischtván –Lebediev sugieren; por eso el uso del D_{84} es recomendado. Si tomamos medidas en el campo, la altura general de socavación puede ser obtenida mediante diferentes métodos.

Aquí se presentan algunos procedimientos que se usaron en este proyecto esporádicamente en un formulario breve. Puede haber muchos otros que cualquier ingeniero puede imaginar y puede poner en práctica.

2.2 DATOS DE ENTRADA

2.2.1 Caudal

Los caudales utilizados en la estimación de socavación, fueron tomados del estudio del Documento de Diagnostico de Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro realizado por GEOTECNOLÓGIA LTDA para la CDMB. [4]

2.2.2 Periodo de retorno

No desconociendo la imposibilidad de estimar un periodo de retorno, dada la falta de datos, y concientes de la poca sensibilidad que ante este parámetro tiene el modelo usado para estimar la profundidad de socavación, se utilizó el periodo de retorno calculado por GRADEX INGENIERIA y presentado en el Documento de Diagnostico de Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro realizado por GEOTECNOLÓGIA LTDA para la CDMB. El marco teórico y cálculo del periodo de retorno, se presenta en el Anexo C

2.2.3 D_{84}

Los valores de D_{84} usados en las modelaciones, corresponden a los resultados de laboratorio (granulometría por tamizado), que se presentan en el capítulo 3 junto con la determinación del D_{84} usando la metodología (frecuencia por número) dirigida a granulometrías de los materiales gruesos superficiales.

2.2.4 Peso específico del agua

El Peso específico de la mezcla de agua-sedimento durante el flujo es el más difícil de obtener cuando no hay una estación de aforo cerca del sitio estudiado, por esta razón se asumió un valor de 1100 kgf/m³, dicho valor es recomendado por Maza, para ríos con las características del río de Oro.

2.2.5 Parámetros geométricos de la sección

Los parámetros geométricos utilizados, se tomaron de las batimetrías hechas por la CDMB para el Diagnostico de Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro realizado.

2.3 CALCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN

- PR0+278

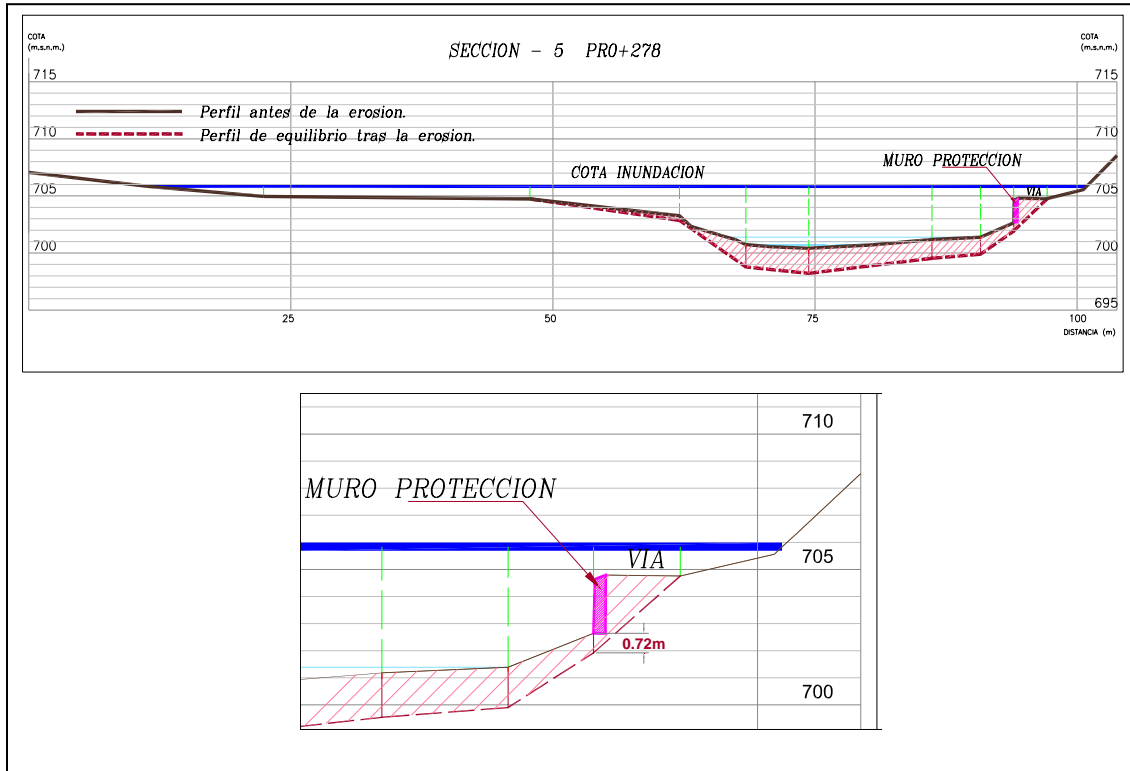


Figura 1. Socavación en el PR0+278. Maza

DATOS DE ENTRADA					
γ_m (Kgf/m ³)	Qdi (m ³ /s)	Bei (m)	D ₈₄ (mm)	T (años)	A (m ²)
1100	560	89.54	2.0	37	213.1

CALCULO PROFUNDIDADES DE SOCAVACION									
d ₀	0.87	1.098	2.58	5.09	5.42	4.65	4.44	3.2	1.08
d _s	0.75	1.01	2.98	7.06	7.62	6.30	5.94	3.92	0.99
Δd	0.00	0.00	0.40	1.96	2.20	1.64	1.49	0.72	0.00

Tabla 1. Socavación en el PR0+278. Maza

- d_0 : altura inicial existente en una determinada línea vertical de la sección, entre el nivel de agua cuando el flujo pasa y el nivel del fondo registrado durante el periodo seco, en m.
- d_s : altura después de la socavación del lecho. Esta es medida desde el nivel de agua cuando un caudal pasa al nivel del fondo erosionado.
- Δd : Profundidad del lecho socavado.

Los cálculos muestran profundidades de socavación de hasta 2.20m de altura, además representa el desalojo de material que se presentó entre el muro y el terraplén de la vía a Zapatota.

En la base del muro la profundidad de socavación calculada es de 0.72m, lo cual indica que el muro existente en este sitio pudo haber sido destruido porque estaba cimentado superficialmente, una parte sobre material aluvial y otra sobre rellenos antrópicos.

- **PR2+528**

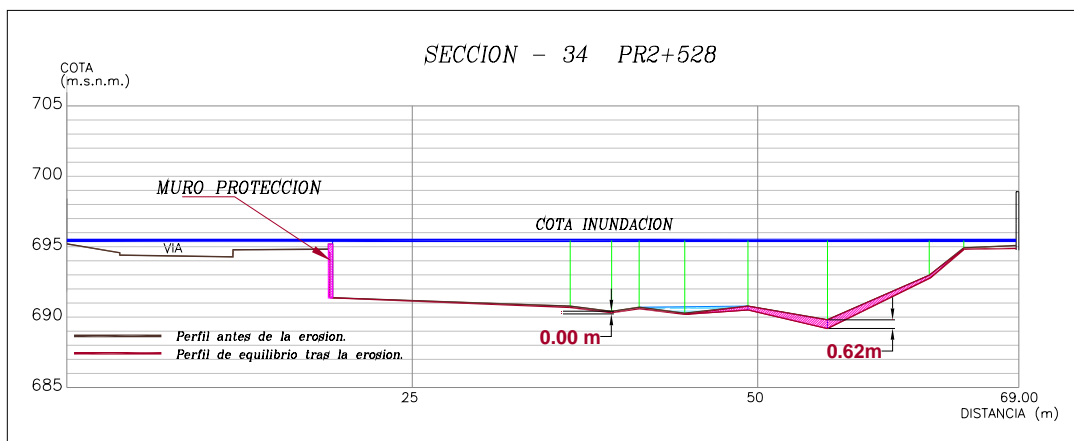


Figura 2. Socavación en el PR2+528. Maza

La sección no posee una rugosidad uniforme, ya que el costado izquierdo predomina un lecho con materiales superiores a 10cm, y el costado izquierdo se caracteriza por ser un lecho de arenas y gravas gruesas. Por esta razón el sector

izquierda de la sección tiene un $D_{84}=140\text{mm}$ y el sector derecho un $D_{84}=2.0\text{mm}$.

DATOS DE ENTRADA-MARGEN IZQUIERDA					
γ_m (Kgf/m ³)	Qdi (m ³ /s)	Bei (m)	D_{84} (mm)	T (años)	A (m ²)
1100	560	65.92	140.0	37	229.81

CALCULO PROFUNDIDADES DE SOCAVACION-MARGEN IZQUIERDA					
d_0	4.07	4.66	5.04	4.74	5.17
d_s	2.86	3.42	4.13	3.79	3.92
Δd	0	0	0	0	0

Tabla 2. Socavación en el PR2+528. Margen izquierda. Maza

DATOS DE ENTRADA- MARGEN DERECHA					
γ_m (Kgf/m ³)	Qdi (m ³ /s)	Bei (m)	D_{84} (mm)	T (anos)	A (m ²)
1100	560	65.92	2.0	37	229.81

CALCULO PROFUNDIDADES DE SOCAVACION-MARGEN DERECHA					
d_0	4.66	5.63	2.47	0.52	
d_s	4.92	6.25	2.2	0.3	
Δd	0.26	0.62	0	0	

Tabla 3. Socavación en el PR2+528. Margen derecha. Maza

Los cálculos muestran profundidades de socavación de hasta 0.62m en la parte derecha de la sección y un lecho sin socavación en el costado izquierdo de la sección.

- PR2+752

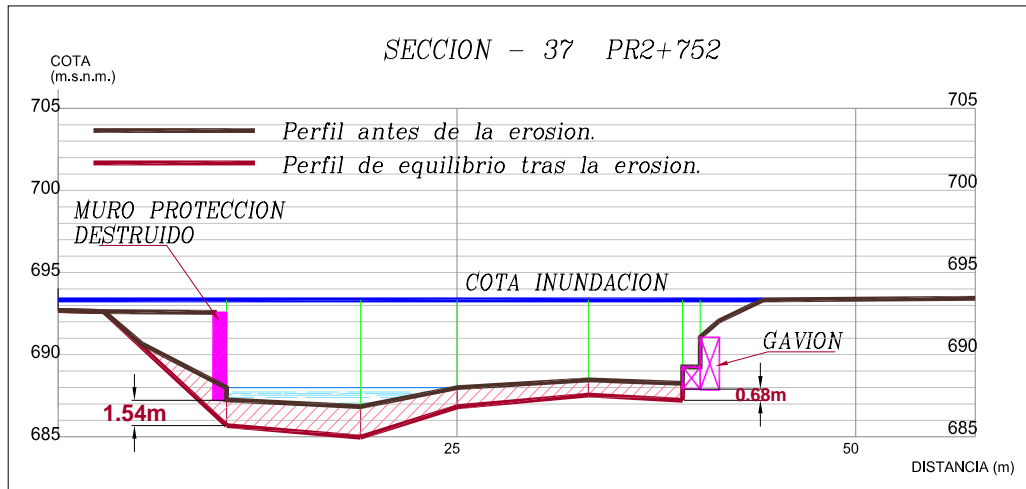


Figura 3. Socavación en el PR2+752. Maza

DATOS DE ENTRADA					
γ_m (Kgf/m ³)	Qdi (m ³ /s)	Bei (m)	D ₈₄ (mm)	T (anos)	A (m ²)
1100	560	44.18	2.5	37	175.83

CALCULO PROFUNDIDADES DE SOCAVACION						
d ₀	6.01	6.5	5.34	4.87	5.08	2.27
d _s	7.57	8.36	6.51	5.79	6.11	2.2
Δd	1.56	1.86	1.17	0.92	1.03	0.00

Tabla 4. Socavación en el PR2+752. Maza

El cálculo de socavación general muestra valores que van desde 1.03m hasta 1.86m.

La socavación presentada en el muro de protección de la plaza de mercado se presume fue la causa de la destrucción, ya que parte del muro esta cimentado superficialmente sobre un relleno.

La estructura de protección en gaviones ubicada en el costado derecho de la sección presenta socavación en la base del muro, que origina grietas en la cabeza del talud que este protege.

• **PR3+757**

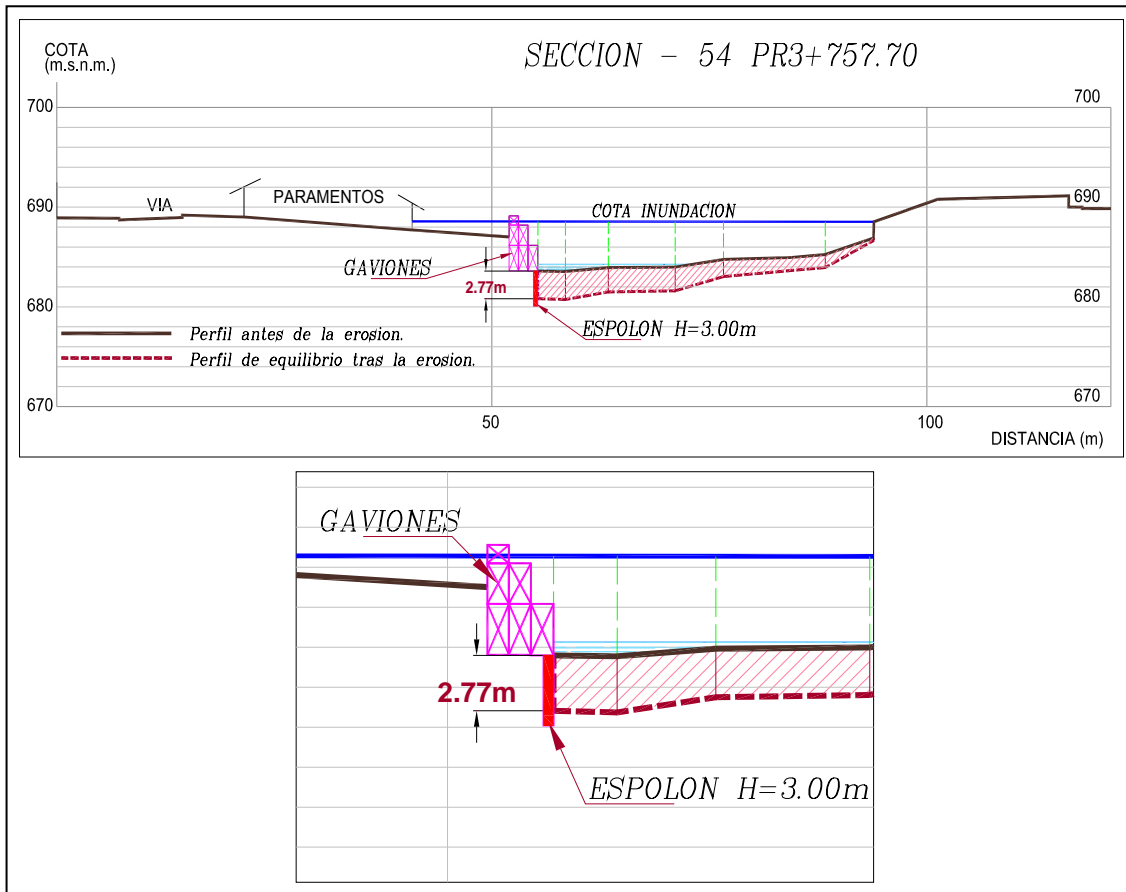


Figura 4. Socavación en el PR3+757. Maza

DATOS DE ENTRADA					
γ_m (Kg/m ³)	Qdi (m ³ /s)	Bei (m)	D ₈₄ (mm)	T (años)	A (m ²)
1100	650	40.85	2.0	37	156.9

CALCULO PROFUNDIDADES DE SOCAVACION							
d ₀	4.96	5.0	4.6	4.55	3.79	3.28	1.62
d _s	7.73	7.81	7.03	6.93	5.5	4.58	1.88
Δd	2.77	2.81	2.43	2.38	1.71	1.3	0.26

Tabla 5. Socavación en el PR3+757. Maza

Los cálculos muestran profundidades de socavación de hasta 2.77m de altura, en la base del muro de protección del barrio El Carmen.

La profundidad de socavación calculada aunque es alta, no fue lo suficientemente fuerte para socavar el espolón de 3.0m de altura que posee ésta estructura de protección.

- **PR4+908**

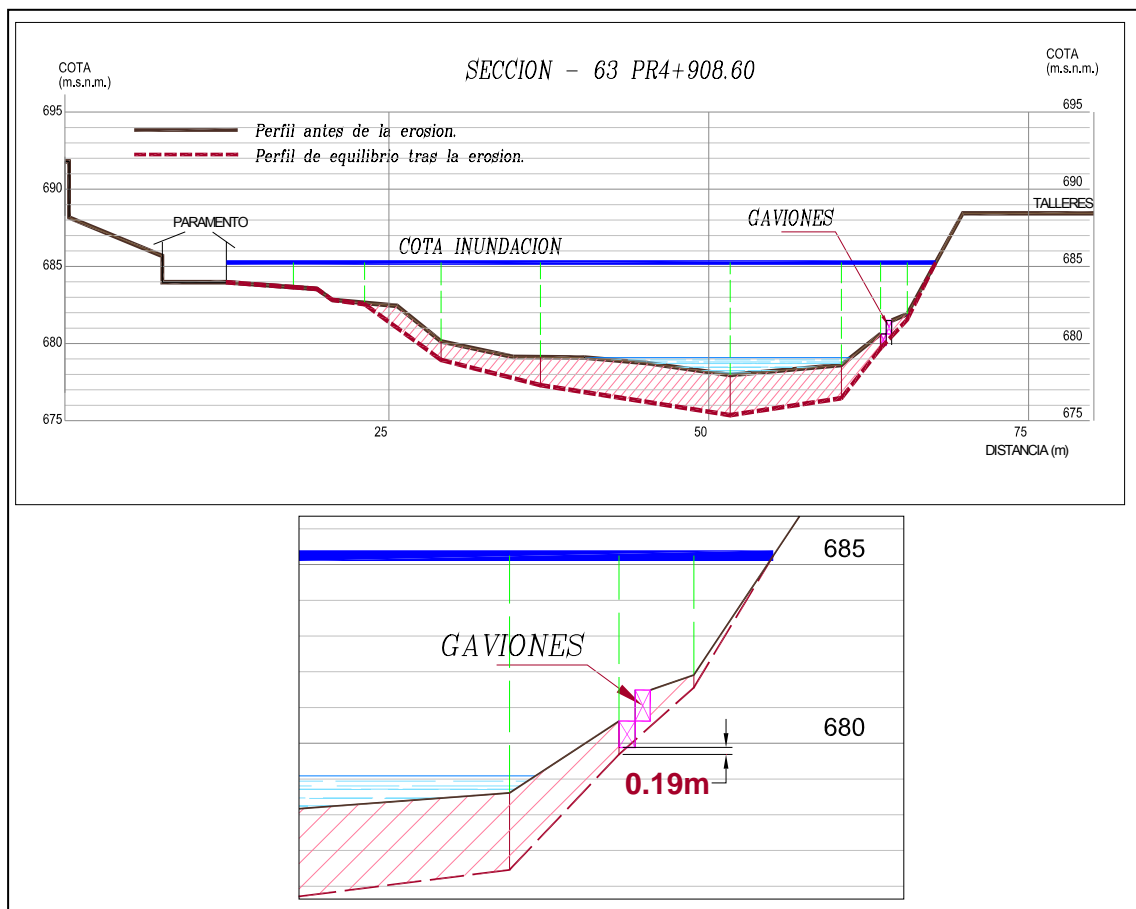


Figura 5. Socavación en el PR4+908. Maza

DATOS DE ENTRADA					
γ_m (Kg/m ³)	Qdi (m ³ /s)	Bei (m)	D ₈₄ (mm)	T (años)	A (m ²)
1100	650	55.43	2.0	37	212.05

CALCULO PROFUNDIDADES DE SOCAVACION								
d ₀	1.60	2.61	5.11	6.13	7.3	6.64	4.63	3.34
d _s	1.45	2.70	6.31	7.95	9.89	8.79	5.56	3.70
Δd	0.00	0.00	1.2	1.81	2.60	2.15	0.93	0.35

Tabla 6. Socavación en el PR4+908. Maza

Los cálculos muestran profundidades de socavación de hasta 2.60m de altura. En la base del muro en gaviones la profundidad de socavación calculada es de 0.19m, lo cual indica que el muro existente en éste sitio pudo haber sido destruido porque estaba cimentado superficialmente, sobre rellenos antrópicos.

2.4 MÉTODO DE LAURSEN

En las referencias se encuentra disponible un número significativo de expresiones de cálculo que permiten evaluar la profundidad esperada debido a procesos de erosión general o por contracción. Puede demostrarse que muchas de estas ecuaciones presentan una estructura prácticamente igual a la propuesta por la metodología de Lischtvan y Lebediev , a pesar de que en alguno de los casos los principios básicos que les han dado origen son diferentes. A continuación se presenta la metodología expuesta por Laursen, E.M.

- **Formula de Laureen**

Laursen (1963) determinó en su estudio de erosión con agua clara que la socavación en una sección contraída llega al equilibrio cuando la tensión de corte actuante (τ_c) alcanza su valor crítico (τ_{c_c}). Por un lado, propone para la estimación de τ_c una ecuación que surge a partir del concepto clásico de

Shields para la situación de fondo hidrodinámicamente rugosa. Por otra parte, τ_0 lo expresa mediante una combinación de la expresión de Manning y la ley de resistencia de Strickler (Aguirre Pe, 1980).

La formula resultante puede escribirse del siguiente modo:

$$h_{si} = \left[\frac{qi}{4.28 * d^{0.25}} \right]^{0.857}$$

Con el fin de confrontar las estimaciones de profundidades de socavación obtenidas por el método de Maza, se plantea determinar mediante el método de Laursen las profundidades de socavación.

Los parámetros de este método son el caudal, ancho del cauce y el diámetro característico del material del fondo del lecho, por lo cual los parámetros del método de Maza se pueden aplicar para este método.

Los resultados de este método se presentan de manera grafica junto con los valores de socavación de Maza, con el objetivo de comparar y verificar cada método.

- **PR0+278**

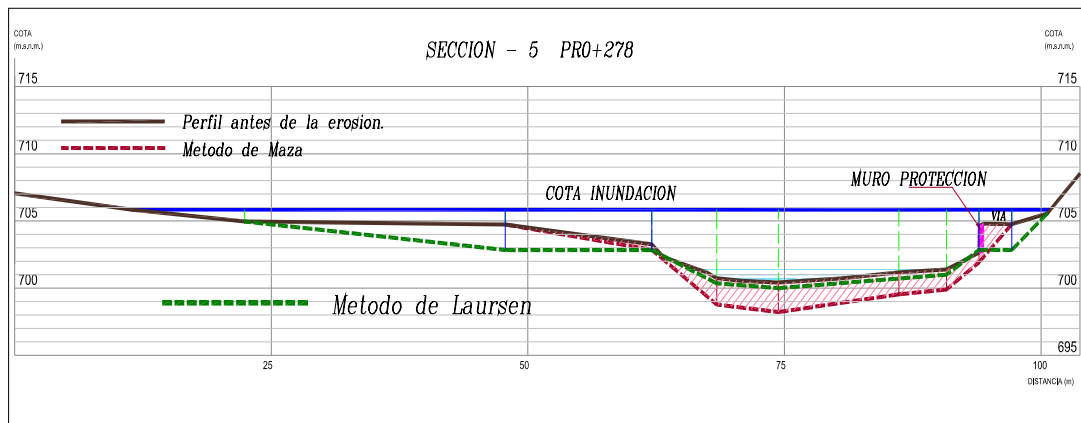


Figura 6. Socavación en el PR0+278. Laursen

- PR2+528

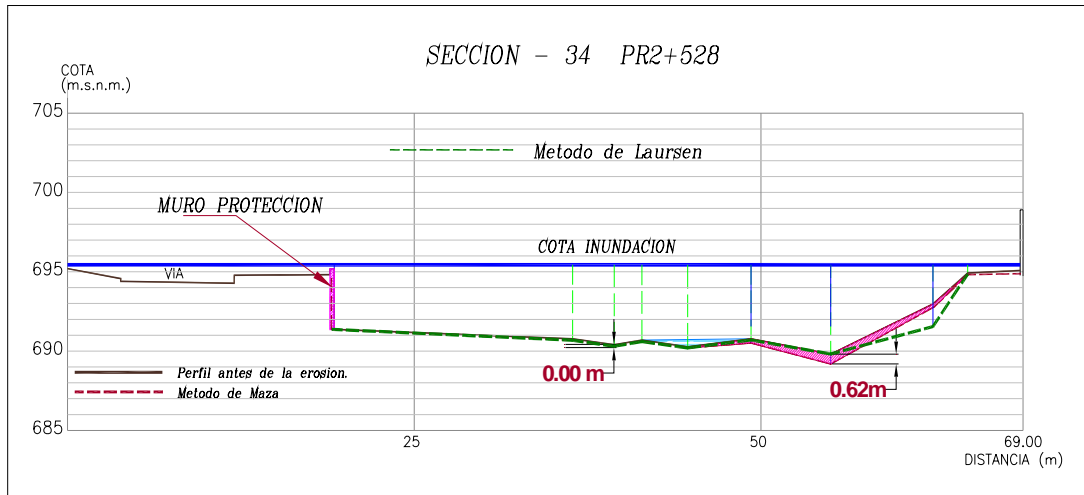


Figura 7. Socavación en el PR2+528. Laursen

- PR2+752

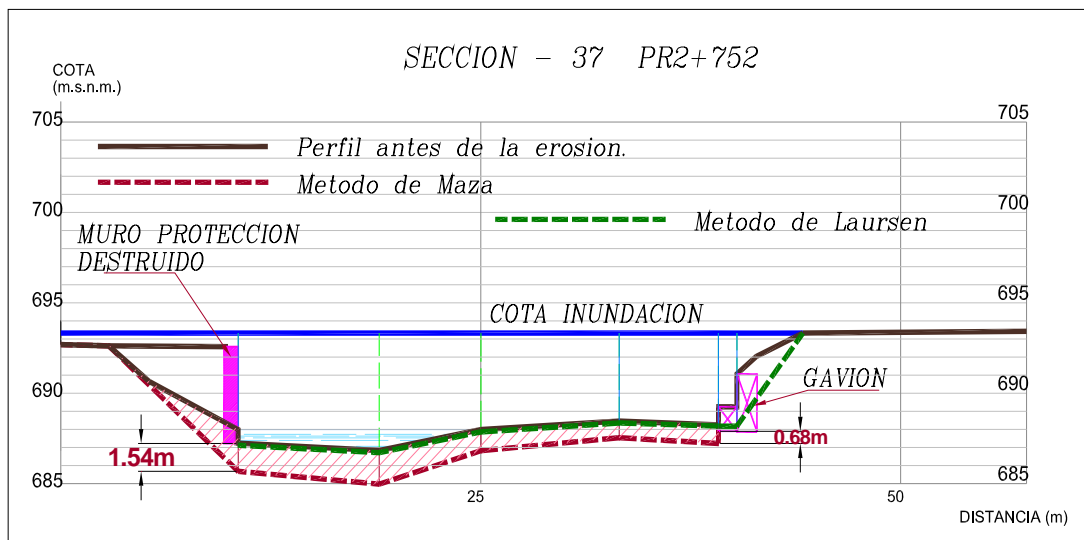


Figura 8. Socavación en el PR2+752. Laursen

- **PR3+757**

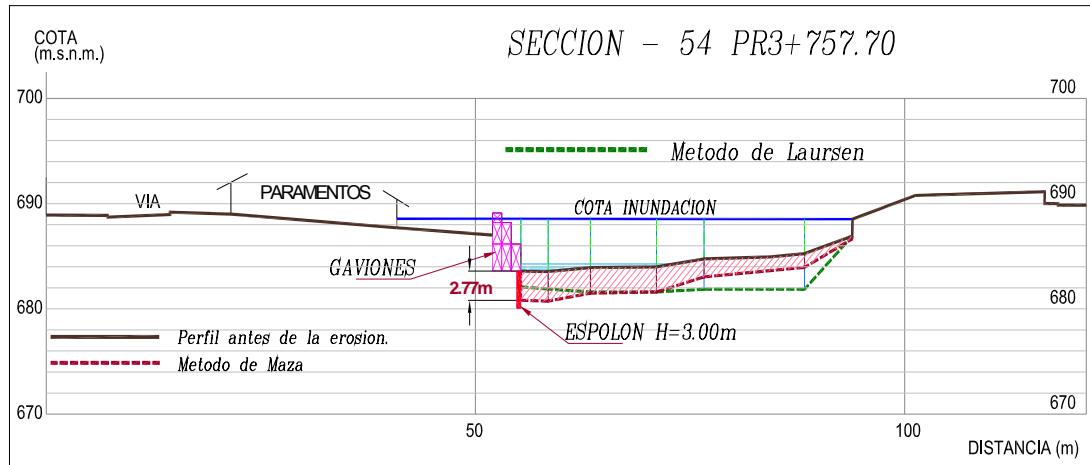


Figura 9. Socavación en el PR3+757. Laursen

- **PR4+908**

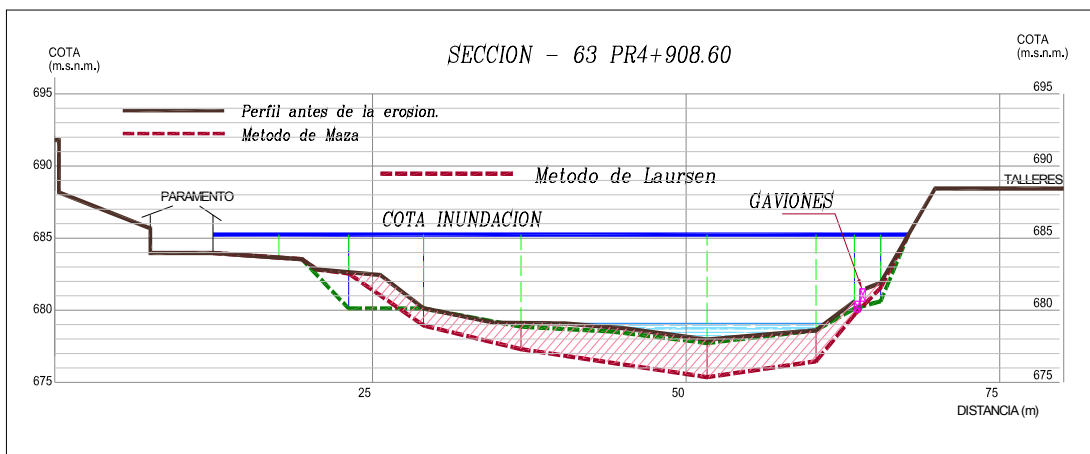


Figura 10. Socavación en el PR4+908. Laursen

En las ilustraciones se resalta el buen grado de ajuste que presenta la fórmula obtenida a partir del método de Lischtván y Lebediev. En efecto, de su análisis se puede ver que la ecuación de Laursen subestima las profundidades de socavación, en la mayoría de los casos.

Esto resulta lógico ya que el planteamiento de esta ecuación considera la hipótesis que el agua es clara; es decir, sin transporte de sedimentos y además rugosidad uniforme del cauce. En resumen, se ha demostrado que las dos ecuaciones presentadas brindan resultados muy diferentes en virtud de los coeficientes de ajuste u de los criterios adoptados para establecer la condición de equilibrio.

3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DEL LECHO DEL RIO DE ORO

Los ríos generalmente presentan un amplio rango de tamaños de partículas en los materiales del lecho, pudiéndose encontrar desde partículas muy finas (limos y arcillas) hasta rocas de gran tamaño. Adicionalmente los ríos presentan una variación espacial y temporal en la composición del material del lecho a causa de diferentes factores, tales como, el régimen de caudales y las tasas asociadas al transporte de sedimentos, los aportes de los ríos tributarios y, en ocasiones, la intervención del hombre.

Una adecuada caracterización de los materiales del lecho de un cauce permite obtener y estimar información muy valiosa para los diferentes estudios que se puedan desarrollar (hidráulicos, sedimentológicos, morfológicos y ambientales). Factores como la rugosidad del cauce, el transporte de sedimentos y los procesos de erosión y sedimentación dependen de las características y distribución de los tamaños de los materiales del fondo.

En este capítulo se presentan los procedimientos seguidos para la caracterización de los materiales del lecho del río de Oro, incluyendo la metodología para la obtención de las muestras, el procesamiento de la información recolectada y el análisis de los resultados obtenidos.

Puesto que la longitud del tramo en estudio es apreciable, es necesario definir un espaciamiento de muestreo óptimo, tal que el número de muestras no resulte excesivo y que a la vez sean representativas de los distintos sectores. Las normas internacionales (ASTM, 1978; BS, 1975) no son específicas en cuanto a la selección del sitio de muestreo y el número de

muestras requeridas para una adecuada caracterización. Se planeó para el trabajo de campo, tomar muestras del lecho con espaciamientos que fluctúan entre 500m y 800m muestreando en los sitios de interés, cerca a las estructuras y dentro de la sección transversal a estudiar y de acuerdo con las características geomorfológicas de los diferentes sectores del río. Debido a que el río presenta sectores donde se observa una cierta estabilidad del lecho, se realizó el muestreo durante el período de sequía, ya que muchos de éstos quedan en seco (o con profundidades de agua muy pequeñas), lo cual facilita el muestreo de la capa superficial y el material subyacente.

3.1 EQUIPO DE MUESTREO

Considerando las características de los sedimentos del Río de Oro, se decidió emplear los siguientes equipos:

- Pala y recipientes herméticos para la toma de muestras en los sitios en los que se identificaron materiales granulares de tamaño fino a medio. Los recipientes herméticos se utilizaron con el fin de evitar el lavado de los sedimentos finos.

- Marco de madera de 1.0m * 1.0m, como referencia para la toma de fotografías digitales utilizadas en el muestreo superficial del material grueso por el método de malla.

3.2 TOMA DE MUESTRAS

Para el muestreo del material del lecho del Río de oro se emplearon dos metodologías diferentes, de acuerdo con los tamaños observados:

- Muestreo de la capa sub-superficial:

- Se colectaron muestras volumétricas de la capa sub-superficial y se analizaron en laboratorio mediante tamizado mecánico (análisis de frecuencia por peso).
- Se utilizó la pala cuando los materiales eran arenas y gravas realizando varios intentos hasta obtener una muestra lo más representativa posible, sin lavado de finos y con el peso necesario para el análisis granulométrico.
- Muestreo superficial del material grueso por el método de malla: puesto que el Río de oro en algunos tramos corresponde a un río de gravas y guijarros (principalmente expuestos en zonas de barras y playas aluviales), fue necesario muestrear las capas superficiales y sub-superficiales. Debido a que estas capas están conformadas por material de diferentes tamaños es importante que sean analizadas separadamente. Cada capa está correlacionada a diferentes propiedades de la corriente (Fripp y Diplas, 1993) [5]. Para el muestreo se adoptó el siguiente procedimiento:

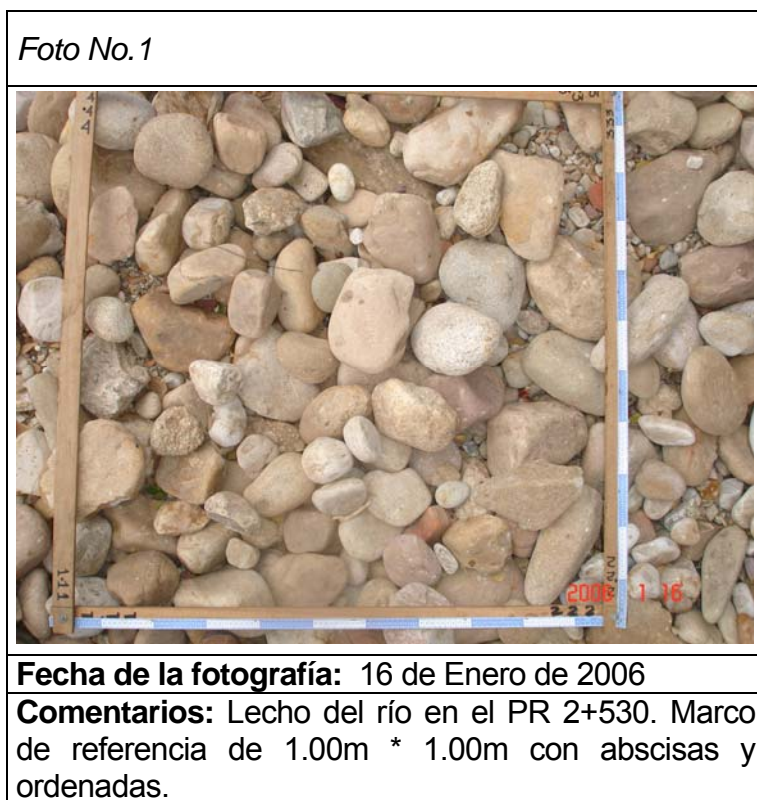
Selección de un sitio representativo de los diferentes tamaños de materiales encontrados

- Ubicación de un marco como referencia de escala, de 50cm x 50cm o de 100cm x 100cm según el tamaño del sedimento, teniendo en cuenta el criterio de Diplas y Fripp (1992), de acuerdo con el cual el área muestreada debe ser mayor o igual a $100(D_{max})^2$
- Toma de fotografía digital normal al lecho, para evitar distorsión en la escala.

La granulometría de los materiales gruesos superficiales se determinó de acuerdo con la metodología (frecuencia por número) que relaciona el área total ocupada por un material de un tamaño preestablecido al área total del muestreo, así:

- Se definieron los siguientes tamaños de grano: mayores a 12cm, 10cm, 9cm, 8cm, 7cm, 6cm, 5cm, 4cm, 3cm, 2cm, 1cm y menores a 1cm.

- Se aproximó la forma de los guijarros presentes en la fotografía (ver Foto No.1) convenientemente ampliada a un elipsoide o una esfera según el caso y se determinó la longitud del eje medio. Con este valor se ubicó cada grano en uno de los rangos establecidos.
- Se determinaron las áreas de las gravas y los guijarros y se sumaron todas las correspondientes a un mismo rango de tamaños.
- Se encontró el porcentaje del área total ocupada por cada rango de tamaños. La fracción de tamaños menores de 1cm se asumió como la diferencia entre el 100% (área total) y la suma de los porcentajes de los demás tamaños.



3.3 CARACTERIZACION VISUAL DE LOS MATERIALES DEL LECHO

La primera fase del trabajo de campo de toma de muestras, es una caracterización visual del lecho del río de oro, con el fin de identificar tramos con

similares características granulométricas. El tramo descrito comprende aproximadamente una longitud de 9Km y corresponde a la zona donde se tiene la mayor densidad de estructuras de protección, zona donde se ha enfocado este proyecto.

- **Análisis de la zona 1 (PR0-200 a PR0+000)**

El grado de fracturación y meteorización de la roca que conforma los taludes de la zona contribuye a la caída de grandes bloques al fondo del río. De igual manera el arrastre de bloques de menor tamaño ha producido el predominio de partículas con tamaños superiores a 25cm en el lecho del río.

La presencia de guijarros y gravas gruesas corresponde al material de depósito reciente.

Los planos de inundación corresponden a la zona baja de los taludes que confinan el río, con pendiente media y abundancia de bloques y guijarros.

- **Análisis de la zona 2 (PR0+000 a PR0+460)**

En el tramo predominan los guijarros y gravas depositados por avenidas antiguas. Sobre la margen izquierda (plano de inundación), arenas y gravas de menor tamaño predominan debido a la deposición de la quebrada que en este sitio confluye.

- **Análisis de la zona 3 (PR0+460 a PR0+650)**

Los materiales de gran tamaño predominan en este tramo, con bloques y guijarros transportados por el río y provenientes de las laderas en la ribera izquierda. En el plano de inundación de la margen derecha es común encontrar una gran cantidad de escombros y basura sobre el depósito aluvial.

- **Análisis de la zona 4 (PR0+650 a PR2+530)**

En el fondo del cauce aflora esporádicamente el miembro Órganos, cubierto parcialmente por depósitos de poco espesor compuesto principalmente por guijarros y gravas. Sobre la margen izquierda afloran materiales mucho más finos, compuestos principalmente por arcillas y arenas finas pertenecientes al miembro Órganos.

Los materiales que conforman el plano de inundación sobre la margen derecha están compuestos principalmente por gravas y guijarros, depositados en el sitio por medios antrópicos.

- **Análisis de la zona 7 (PR2+530 a PR2+950)**

Predominan en este sector los bloques y guijarros mayores a 15cm de diámetro. La velocidad alta del flujo aguas abajo de la batea elimina la presencia de finos y arenas. Los planos de inundación se encuentran construidos y la cota de fondo del plano es varios metros superior a la de fondo del cauce.

- **Análisis de la zona 8 (PR2+950 a PR3+720)**

En el canal predominan materiales gruesos que conforman el depósito aluvial reciente. Granulométricamente están conformados por bloques, guijarros y gravas; existen materiales un poco más finos abajo de la confluencia con el río Frío. En los planos de inundación los materiales se componen principalmente de arenas y gravas que conforman los rellenos antrópicos.

- **Análisis de la zona 9 (PR3+720 a PR4+870)**

Continúa la presencia de materiales gruesos en el fondo del cauce en la parte alta del tramo. Bloques, guijarros y gravas predominan tanto en el fondo del cauce como en los planos de inundación no intervenidos.

En las zonas de relleno continúa la presencia de materiales heterogéneos sueltos y erosionables en las áreas de El Carmen y El Portal.

El fondo del río evidencia un cambio de material a partir del puente Palenque, donde afloran materiales pertenecientes al segmento inferior del miembro Órganos, compuesto principalmente por arcillas y arenas finas.

- **Análisis de la zona 10 (PR4+870 a PR6+250)**

En el fondo del río afloran materiales arcillosos resistentes a la erosión con esporádicos bloques y guijarros depositados recientemente. Sobre los planos de inundación que han sido rellenados predominan materiales heterogéneos con presencia de arenas, limos, gravas y escombros.

En la parte baja del tramo, en el área de ampliación del valle del río los rellenos desaparecen y los materiales que componen los planos de inundación consisten en depósitos aluviales recientes, compuestos por gravas, guijarros y algunos bloques.

- **Análisis de la zona 11 (PR6+250 a PR7+750)**

El fondo del río se encuentra sobre un depósito aluvial reciente de poco espesor granulométricamente compuesto por bloques, guijarros y gravas.

Sobre la orilla izquierda aparecen materiales pertenecientes al miembro Órganos. El depósito aluvial de la margen derecha ha sido cubierto parcialmente por los rellenos anteriormente mencionados, compuestos en gran porcentaje por escombros, basuras y materiales gruesos.

- **Análisis de la zona 13 (PR7+750 a PR9+450)**

La presencia de materiales más finos en el fondo del cauce se evidencia con afloramientos esporádicos de la formación Órganos. Los porcentajes de bloques y guijarros disminuyen considerablemente en este sector.

Los materiales recientemente depositados en los planos de inundación se componen principalmente por arenas finas, con niveles gravosos de mayor permeabilidad.

Sobre la margen derecha predominan las arenas y gravas que componen los rellenos conformados para la construcción del Parque Industrial.

El segmento inferior del miembro Órganos (arcilloso) aflora continuamente sobre la margen izquierda, subyaciendo un delgado depósito reciente con niveles gravosos y limosos.

3.4 GRANULOMETRIA DEL MATERIAL DEL LECHO DEL RIO DE ORO

Se realizaron ensayos (ver Anexo C) de granulometría por tamizado, y se obtuvieron las curvas granulométricas para cada una de las muestras.

Dado que la mayoría de las estructuras de protección están localizadas en los primeros 5km de río, el análisis de la información se hizo para las muestras tomadas en este tramo del río, a continuación se presentan las curvas granulométricas (ver Figura 11) de las primeras 10 zonas, a partir de estas curvas se determinaron los diámetros característicos.

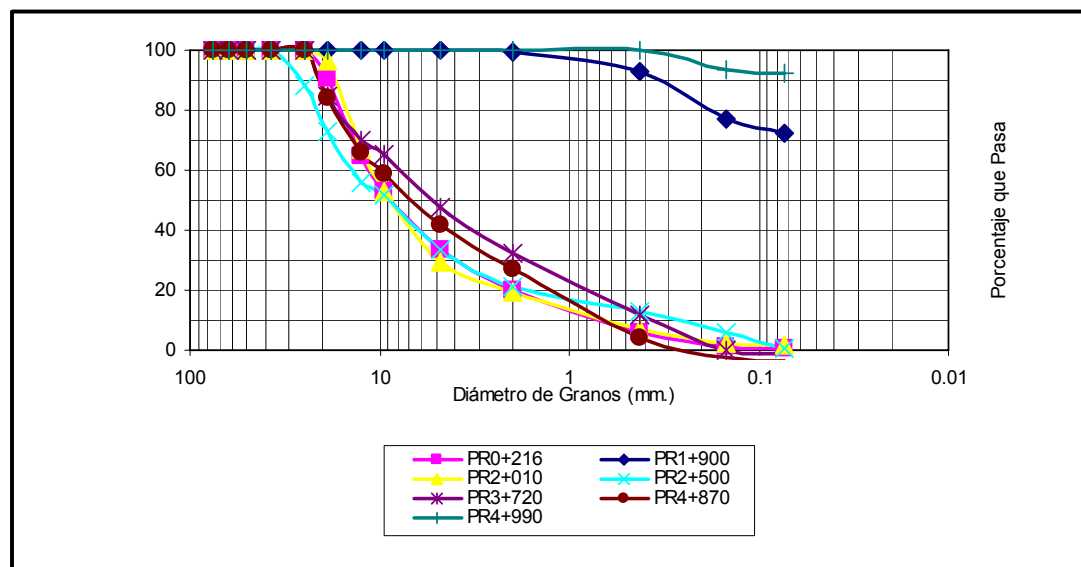


Figura 11. Curvas granulométricas de las primeras 10 zonas

En la Figura 12. se presenta la curva granulométrica del material superficial en el PR+530 (parte de la zona 7) obtenida mediante muestreo de malla y análisis de frecuencia por número.

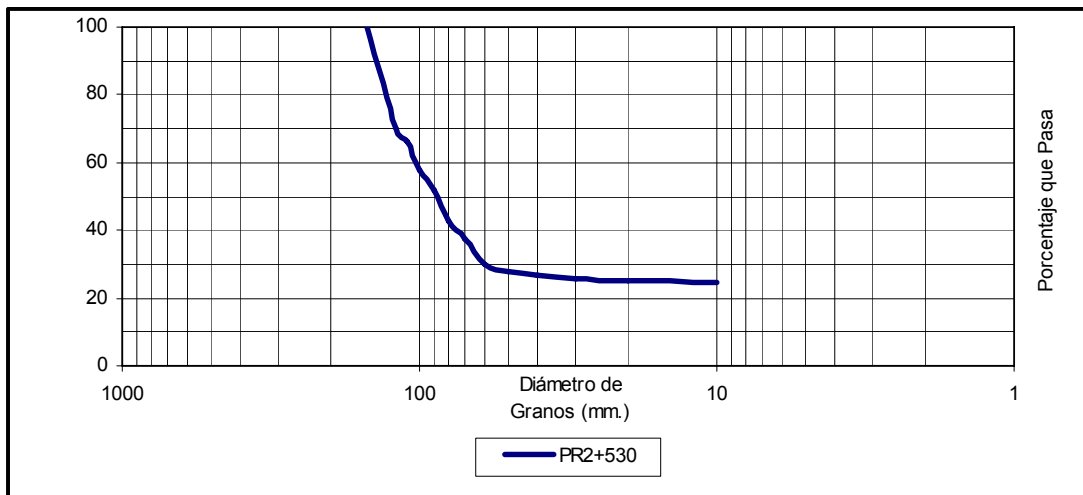


Figura 12. Curva granulométrica. Zona 7 - PR 2+530.

En resumen, en el estudio de los 5.0km de río fue posible identificar tramos de granulometría relativamente homogénea. El lecho del Río de oro está conformado principalmente por sedimentos de tres tipos de materiales así:

- Depósitos aluviales recientes, compuestos principalmente por gravas arenosas bien gradadas con porcentajes de finos inferiores al 5%. Se clasifican como GW, GM, SW, SM, GW-GM y SW-SM.
- Materiales más finos en el fondo del cauce, compuestos por arcillas y limos arcillosos.

- Bloques y guijarros mayores a 15cm de diámetro.

4. FORMACIONES GEOLÓGICAS DEL RIO DE ORO

El tramo en estudio tiene una longitud de 9.0Km, desde el sector de Vahondo hasta el sector del barrio Convivir. En la zona de influencia del área de estudio afloran las siguientes unidades geológicas: Formación Bocas, Formación Girón, Miembro Órganos de la formación Bucaramanga, Depósitos de flujos de escombros, Depósitos de Ladera y aluviales recientes asociados al Río de Oro y las quebradas que atraviesan el abanico aluvial de Bucaramanga.

Esta breve descripción presenta las principales características de los suelos de la cuenca en lo que se refiere a las propiedades litológicas y granulométricas:

- **Suelos residuales de la formación Girón**

Los suelos residuales de la formación Girón son generalmente arcillas arenosas y arcillas de baja plasticidad. Se clasifican como CL ML y ocasionalmente como SC y SM.

- **Suelos residuales de la formación Tambor**

Los suelos residuales de la formación Tambor son principalmente arenas limosas y limos arenosos y se clasifican como SM SC y ML.

- **Suelos de la formación Órganos Superior**

Suelos granulares especialmente gravas y arenas con bajo contenido de finos. Se clasifican como GM SM y con doble símbolo GW-GM y SW-SM.

- **Suelos de la formación Órganos Inferior**

Arcillas y limos arcillosos. Se clasifican como CL, ML, SC, SM.

- **Depósitos Aluviales**

Los suelos de los aluviones que conforman el valle aluvial y los depósitos recientes del río son principalmente gravas arenosas bien gradadas con porcentajes de finos inferiores al 5%. Se clasifican como GW, GM, SW, SM, GW-GM y SW-SM.

- **Rellenos Antrópicos**

Son depósitos de suelos generalmente areno-limosos y de residuos de construcción basuras y suelos orgánicos.

La descripción y los párrafos anteriores son extraídos del Documento de Diagnostico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro realizado por GEOTECNOLOGÍA LTDA para la CDMB.

4.1 INFLUENCIA DE LA FORMACIÓN GEOLÓGICA EN LA ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Según Suárez (2001) [6], uno de los factores que más afecta la estabilidad de las estructuras de protección es la geología y en especial la litología, la estructura y la tectónica. La litología controla en muchos casos los anchos y profundidades de los canales y la tectónica afecta en forma determinante el alineamiento del río.

A continuación se presentan las diferentes formaciones sobre las cuales se cimentaron las estructuras de protección y la influencia que estas tuvieron sobre la respuesta de las mismas ante el evento de referencia.

Adicionalmente se presenta una tabla resumen (Tabla 6) que contiene la estructura, unidad geológica sobre la que la estructura de protección esta cimentada y el estado final después del evento.

- **Afloramientos de roca.**

El río de oro se caracteriza por presentar áreas con afloramientos de roca y al mismo tiempo depósitos aluviales; estos afloramientos funcionan como controles geológicos que direccional el flujo y modifican el alineamiento del río.

Este comportamiento se observa en el sector de Vahondo, en donde, sobre las dos márgenes del río, aflora la formación Girón. Aunque en el sector aparece roca muy meteorizada, los afloramientos del fondo del río son resistentes a procesos erosivos.

Esto concuerda con el comportamiento de las estructuras de protección que estaban cimentadas sobre esta formación, las cuales durante la avenida de febrero de 2005 no sufrieron procesos erosivos que pusieran en riesgo su estabilidad.

Los muros 1 y 2, (ver Tabla 6), están cimentados sobre la formación Girón, durante el evento tuvieron gran pérdida de material del relleno que están conteniendo, aun así, no se vio afectada su estabilidad ni se evidenciaron procesos de erosión en la cimentación.

No sucedió lo mismo con los muros que estaban aguas abajo de estos afloramientos, los cuales fallaron debido a que estaban cimentados sobre rellenos antrópicos; además reciben el flujo acelerado de aguas arriba, de la batea vahondo, a causa del punto de control que genera el afloramiento de la formación Girón sobre las dos márgenes.

La presencia de roca en el fondo del cauce impide la profundización y en el momento de las grandes crecientes al no poder socavar, el río trata de erosionar las orillas, produciéndose ampliación lateral del cauce.

- **Rellenos antrópicos**

Los ríos que discurren entre materiales erodables tienden a ser más sensitivos que los que se encuentran sobre materiales muy resistentes a la erosión. Generalmente, los materiales depositados recientemente presentan mayor erodabilidad que los materiales antiguos. Cada formación geológica o manto de roca o suelo presenta condiciones diferentes de erodabilidad, lo cual equivale a una dinámica relativa al material.

Es así como todos los muros cimentados sobre rellenos antrópicos, fueron destruidos o están afectados por procesos erosivos importantes.

La mayoría de los muros de protección que están cimentados sobre rellenos antrópicos se han hecho para la construcción de vías, viviendas o industrias, restándole sección al río, acelerando el flujo y generando velocidades muy altas que socavan material el relleno.

Los muros 3, 11, 18 y 19, presentan destrucción total o parcial, estando cimentados sobre rellenos antrópicos.

- **Formación órganos inferior**

La formación órganos inferior esta compuesta por materiales cohesivos cuyas velocidades de socavación son muy altas, es por eso que esta formación se considera poco susceptible a procesos importantes de erosión a corto plazo.

Las estructuras de protección cimentadas sobre la formación órganos inferior, no presentan evidencias de socavación, esto no quiere decir que esta formación no sea susceptible a procesos de erosión.

- **Depósitos aluviales**

Las estructuras cimentadas sobre estas unidades geológicas presentaron diferentes comportamientos durante el evento de febrero de 2005.

En el sector 1, los muros cimentados sobre depósitos aluviales no presentan evidencias de socavación, debido a la gran deposición de material que hay en el pie de estas estructuras.

En el sector 2 existen tramos en los que los materiales del lecho se caracteriza por la presencia de guijarros y grandes bloques que mitigan en cierto grado los efectos erosivos del río.

En los sectores 2, 3 y 4 en los tramos de río en los que los depósitos aluviales presentan una gradación compuesta por arenas y gravas de tamaño fino a medio, hay evidencia de que el lecho se erosiono durante la avenida y posteriormente ocurrió un proceso de deposición. En estos tramos del río, las estructuras de protección cuyas cimentaciones estaban de manera superficial fueron destruidas o presentan procesos de erosión en la base.

No	Localización	Cimentación	Comportamiento durante el evento
Sector 1 - Bahondo a Parque Gallineral			
1	• PR 0 +165 BATEA BAHONDO (margen derecha)	FORMACION GIRON	En pie.
2	• PR 0+165 BATEA BAHONDO (margen izquierda)	FORMACION GIRON	En pie.
3	• PR 0 + 250 VÍA ZAPATOCA (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES Y RELLENOS ANTROPICOS	Destrucción total.
4	• PR 0 + 450 BARRIO LAS MARIAS (margen derecha)	RELLENOS ANTROPICOS	Destrucción total.
5	• PR 1 +250 TREFILCO (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
Sector 2 - Parque Gallineral al Poblado			
6	• PR 2 + 350 MALECÓN (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
7	• PR 2 + 530 BATEA (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
8	• PR 2 + 530 BATEA-PUENTE LENGUERKE (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
9	• PR 2 + 700 PUENTE LENGUERKE (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
10	• PR 2 + 710 PROTECCIÓN ESTRIBO (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
11	• PR 2 + 720 CASA DE MERCADO (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES Y RELLENOS ANTROPICOS	Colapso parcial en un 10% de longitud de la estructura
12	• PR 2 + 760 BARRIO VILLA CAMPESTRE II (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
13	• PR 3 + 150 URBANIZACIÓN CASTILLA REAL (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
14	• PR 3 + 350 BARRIO EL POBLADO (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
15	• PR 3 + 500 ENTREGA QUEBRADA PADRE JESÚS (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	Colapso parcial en un 30% de longitud de la estructura
16	• PR PR 3 + 730 BARRIO EL CARMEN (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
Sector 3 - El Poblado a Saceites			
17	• PR 4 + 660 COLEGIO JOSÉ ALEJANDRO PERALTA (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES	En pie.
18	• PR 4 + 880 PUENTE PALENQUE (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES Y RELLENOS ANTROPICOS	Destrucción total.
19	• PR 4 + 895 PUENTE PALENQUE (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES Y RELLENOS ANTROPICOS	Destrucción total.
20	• PR 4 + 850 PUENTE PALENQUE (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	Destrucción total.
21	• PR 4 + 880 PUENTE PALENQUE (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES Y MIEMBRO ORGANOS INFERIOR	En pie.
22	• PR 5 + 00 BARRIO SAN ANTONIO DEL CARRIZAL (margen izquierda)	DEPOSITOS ALUVIALES , MIEMBRO ORGANOS INFERIOR Y RELLENOS	Algunas en pie y otras sufrieron destrucción total.
Sector 4 - Saceites a Parque Industrial 1			
23	• PR PR 7 + 350 BARRIO JOSÉ A. GALÁN (margen derecha)	DEPOSITOS ALUVIALES	80 m destruidos, 200 m sepultado bajo material de transporte y 90 m en pie y al descubierto

Tabla 6. Resumen. Estructura, Unidad geológica y comportamiento.

5. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y DINÁMICAS DEL RÍO DE ORO

En este capítulo se presenta una extracción del documento Stream Stability at Highway Structures HEC-20 (Third Edition) producción del National Highway Institute [7] en el cual se exponen los conceptos básicos y las metodologías para realizar el análisis geomorfológico cualitativo, análisis cuantitativo y aplicación de modelos matemáticos o físicos, enmarcado todo dentro de un proceso general para hallar la solución a los problemas de inestabilidad. Dado el limitado alcance de ésta tesis, sólo se hará de manera muy general, un análisis geomorfológico cualitativo del río de oro, y se hará hincapié en las zonas donde se detectaron procesos de erosión existentes y procesos activados a raíz del evento de referencia. Éstas zonas son las mismas tratadas en el capítulo 4.

En ríos con lechos y bancos compuestos de material de transporte o erosionable, es la regla en lugar de la excepción que sufran modificaciones con el tiempo. Estos ríos cambian continuamente de posición y forma como consecuencia de fuerzas hidráulicas ejercidas en el lecho y bancos. Estos cambios pueden ser graduales o rápidos y pueden ser el resultado de causas naturales o actividades humanas.

Otros ríos con lechos y bancos compuestos de material poco erosionables como guijarros, cantos rodados o lecho de roca, son en general estables, pero deben analizarse cuidadosamente para la estabilidad ante eventos extraordinarios.

Un estudio de planta y perfil es muy útil para comprender la morfología de un río. Las apariencias en planta son variadas y son el resultado de muchas variables entrelazadas. Los cambios pequeños en una variable pueden cambiar la vista en planta y perfil de un río, afectando una carretera que cruza adversamente o edificaciones que invaden el río. Recíprocamente, una carretera que cruza o la invasión puede cambiar una variable inadvertidamente, afectando el río.

5.1 FACTORES GEOFORMOLOGICOS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LAS CORRIENTES

La Figure 8. presenta una serie de factores geomorfológicos que pueden afectar la estabilidad del río. Cada una de las propiedades geomorfológicas listadas en la columna izquierda de la Figura 13. podría usarse como la base de una caracterización de ríos. El acercamiento presentado aquí es basado en propiedades de ríos observadas en fotografías satelitales y en el campo. Su mayor propósito es facilitar la valoración de ríos. Se describen los tipos de ríos comunes y su importancia para la ingeniería.

Esta sección es organizada según Figura 13. Ninguna importancia particular se asigna al orden de la figura.

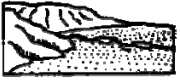






























STREAM SIZE (Sect 2.3.2)	Small [< 30 m (100 ft.) wide]	Medium [30-150 m (100-500 ft.)]		Wide [> 150 m (500 ft.)]	
FLOW HABIT (Sect 2.3.3)	Ephemeral	(Intermittent)	Perennial but flashy	Perennial	
BED MATERIAL (Sect 2.3.4)	Silt-Clay	Silt	Sand	Gravel	Cobble or Boulder
VALLEY SETTING (Sect 2.3.5)	 No valley; alluvial fan	 Low relief valley [< 30 m (100 ft.) deep]	 Moderate relief [30-300 m (100-1000 ft.) deep]	 High relief [> 300 m (1000 ft.) deep]	
FLOODPLAINS (Sect 2.3.6)	 Little or none (< 2 x channel width)	 Narrow (2-10 x channel width)		 Wide (> 10 x channel width)	
NATURAL LEVEES (Sect 2.3.7)	 Little or none	 Mainly on concave		 Well developed on both banks	
APPARENT INCISION (Sect 2.3.8)	 Not Incised		 Probably Incised		
CHANNEL BOUNDARIES (Sect 2.3.9)	 Alluvial	 Semi-alluvial		 Non-alluvial	
TREE COVER ON BANKS (Sect 2.3.9)	< 50 percent of bankline	50-90 percent of bankline		> 90 percent of bankline	
SINUOSITY (Sect 2.3.10)	 Straight Sinuosity (1-1.05)	 Sinuous (1.06-1.25)	 Meandering (1.25-2.0)	 Highly Meandering (> 2.0)	
BRAIDED STREAMS (Sect 2.3.11)	 Not braided (< 5 percent)	 Locally braided (5-35 percent)		 Generally braided (> 35 percent)	
ANABRANCHED STREAMS (Sect 2.3.12)	 Not anabranching (< 5 percent)	 Locally anabranching (5-35 percent)		 Generally anabranching (> 35 percent)	
VARIABILITY OF WIDTH AND DEVELOPMENT OF BARS (Sect 2.3.13)	 Narrow point bars	 Equiwidth	 Wider at bends	 Random variation	
		 Wide point bars		 Irregular point and lateral bars	

Figura 13. Factores geomorfológicos que afectan la estabilidad de las corrientes. (Adaptado de Brice y Blodgett)

5.1.1 Tamaño del río

La profundidad del río tiende a aumentar con el tamaño, y el potencial para erosionar aumenta con la profundidad. Así, la profundidad potencial de erosión aumenta con el tamaño del río ante una creciente. El potencial para la erosión lateral también aumenta con el tamaño del río.

El tamaño de un río puede indicarse por la descarga, área del desagüe, o alguna medida de dimensiones del río, como anchura o el área de la sección. Ninguna medida de tamaño es satisfactoria debido a la diversidad de tipos de ríos. Para los propósitos de clasificación de ríos (Figura 13), la anchura de río de banco a banco es escogida como la medida generalmente más útil de tamaño, y los ríos son arbitrariamente divididos en tres categorías de tamaño en base a la anchura. La anchura del río no incluye la anchura de las planicies de inundación.

La anchura del banco a banco a veces es difícil de definir para los propósitos de medida cuando uno de los bancos es indefinido. La posición de la línea de vegetación permanente en el banco interior es el mejor indicador disponible de la línea bancaria. Para los ríos sinuosos o con meandros, la anchura está moderada en los tramos rectos o las inflexiones entre curvaturas donde tiende a ser muy consistente. Para los ríos de cauces múltiples, la anchura es la suma de las anchuras individuales de los cauces.

La División de Cartografía Nacional del Estudio Geológico Americano (USGS) denomina la fase "normal", la fase que prevalece durante la mayor parte del año para representar los ríos en los mapas topográficos. Ellos encuentran que la fase "normal" para un río perenne normalmente corresponde al agua de relleno nivelando el cauce con la línea de vegetación permanente a lo largo de sus bancos. *La fase normal también se adopta aquí para definir la anchura del cauce.*

5.1.2 Hábito de flujo

El hábito de flujo de un río puede ser efímero, perenne pero relumbrante, o perenne. Un río efímero fluye brevemente en la contestación directa a la precipitación, y usado aquí, incluye los ríos intermitentes. Un río perenne fluye todo o la mayoría del año. Los arroyos perennes pueden ser relativamente estables o inestables, dependiendo de otros factores como los límites del cauce y material del lecho.

5.1.3 Material del lecho

Los ríos son clasificados, según el tamaño dominante del sedimento en sus lechos, como lecho limo-arcilloso, lecho de arena, lecho de arena gruesa, y guijarro o lecho de canto rodado. La determinación exacta de la distribución de tamaños de partículas de material del lecho requiere cuidadoso muestreo y análisis, particularmente para lechos de material grueso, pero para la mayoría de los lechos las designaciones de los materiales, pueden derivarse de las aproximaciones de una observación visual.

Las más grandes profundidades de erosión normalmente se encuentran en ríos que tienen lecho de arena o lecho areno-limoso. La conclusión general es que los problemas de erosión son comunes en ríos que tienen lecho de material arenoso y lecho fino. Sin embargo, socavaciones muy profundas son más probables en lechos de material fino. En general, ríos aluviales (lecho arenoso) son menos estables que los ríos con lecho grueso o cohesivo y material bancario.

5.1.4 Escenario del valle

El relieve del valle se usa como un medio para indicar si el terreno circundante es en general plano, ondulado o montañoso. Para un sitio particular, el relieve es medido (normalmente en un mapa topográfico) desde el fondo del valle a la cima más adyacente que lo divide. Relieves mayores a 300m se consideran montañosos, y relieves en el rango de 30m a 300m se consideran ondulados. Los ríos en las regiones montañosas tienen cuestas empinadas y son muy

probablemente lechos de material grueso. Los ríos en las regiones de relieve más bajos son normalmente aluviales y exhiben más problemas debido a la erosión lateral en los cauces.

Un río en abanico aluvial o piedemonte propone problemas especiales. En la desembocadura del piedemonte se pasa de un canal definido por montañas a lo largo, a una zona sin limitaciones, y los ríos que salen del frente montañoso pueden tener que cambiar de curso y pobremente se pueden definir otros cauces, como en un abanico aluvial. Los abanicos aluviales ocurren dondequiera que hay un cambio de empinado a una pendiente llana. Debido a la reducción súbita en pendiente y velocidad los materiales de arrastre se depositan en el lecho. Los abanicos aluviales también son caracterizados por geometrías del cauce inestables y el movimiento lateral rápido.

5.1.5 Planicies de inundación

Se define planicie de inundación como las tierras bajas aluviales casi llanas que se encuentran a la orilla de un río y que están sujetas a la inundación en las avenidas. La capa vegetativa, uso de la tierra, y profundidad de flujo en la planicie de inundación son factores significativos en la estabilidad de cauce. En Figura 13, se clasifican las planicies de inundación según el ancho de la planicie relativo al ancho del canal.

Con el tiempo, un área de las regiones montañosas se estropea en la zona baja, los ríos corren sus bancos, y el material que se corre se utiliza río abajo, más lejos para construir bancos y barras. Los ríos se mueven lateralmente, mientras empujan las regiones montañosas atrás. Pequeños valles aluviales y planicies de tierra se forman. Cuando el sedimento de transporte del río pasa las áreas de cuevas a áreas más planas y, en particular, a los cuerpos de agua donde la velocidad y la turbulencia es demasiado pequeña para sostener el transporte del material, el material que forma los deltas se deposita. Los deltas se forman río arriba, elevado el nivel a través de la deposición de material y convirtiéndolo en parte de la planicie de inundación. Los arroyos viejos están lejos de la estática.

Los ríos viejos serpentean, y son afectados por los cambios en el nivel del mar, influenciado por los movimientos de la corteza terrestre, cambiados por formaciones de deltas o glaciación, y sujeto a las modificaciones debidas a los cambios climatológicos y a las consecuencias del desarrollo del hombre.

5.1.6 Diques naturales

Los diques naturales se forman durante las avenidas, al excederse las bancas. El sedimento se deposita entonces en las planicies de inundación debido a la reducción de la velocidad y la capacidad de transporte de la avenida.

La clasificación con base en los diques naturales se ilustra en Figura 13. Los ríos con diques bien desarrollados tienden a ser de anchura constante y tener proporciones bajas de migración lateral.

5.1.7 Incisión visible

Se juzga la incisión visible del cauce del río, con la altura de sus bancos respecto a su anchura. Para un río cuya anchura es aproximadamente 30m, alturas bancarias en el rango de 1.8 a 3.0m es casi el promedio, y los bancos más altos indican la probable incisión. Para un río cuya anchura es aproximadamente 300m, alturas bancarias en el rango de 3.0 a 5.0m es casi el promedio, y los bancos más altos indican la probable incisión. La rata de erosión lateral es probablemente lenta, salvo en ríos con bancos altos, verticales, y claramente inestables.

5.1.8 Límites del cauce y vegetación

Aunque ninguna definición precisa puede darse para los ríos aluviales, semi-aluviales, o no aluviales, alguna distinción debe hacerse con respecto a la resistencia a la erosión del material de los límites del cauce. En la geología, el lecho de roca es principalmente distinguido del aluvión y otros materiales de la superficie en base a la edad, en lugar de la resistencia a la erosión. Es probable que una arcilla aluvial compacta sea más resistente que una arenisca débilmente

consolidada y más vieja. No obstante, el término "lecho de roca" lleva una connotación de resistencia mayor a la erosión, y se usa aquí en ese sentido. Un cauce aluvial está en aluvión, un cauce non-aluvial está en el lecho de roca o en material muy grande (los guijarros y cantos rodados) estos no se erosionan excepto ante avenidas muy grandes, y un cauce semi-aluvial tiene lecho de roca y aluvión en sus límites. El lecho de roca de cauces no aluviales puede ser totalmente o en parte cubierto con el sedimento en las fases bajas, pero probablemente será expuesto por la erosión durante las avenidas.

Los problemas serios y fracasos en fundaciones han sido con esquistos, areniscas, calizas, material glacial, y otras rocas erosionables.

Los cambios en la geometría del cauce con el tiempo son particularmente significantes durante los períodos cuando los cauces aluviales, están sujetos a los flujos altos, y pocos cambios ocurren durante los períodos relativamente secos. Las fuerzas erosivas durante los períodos de flujo alto pueden tener una capacidad hasta 100 veces mayor que esas fuerzas que actúan durante los períodos intermedios y en situaciones de flujo bajo. En la mayoría de los casos puede mostrarse, considerado la estabilidad de ríos aluviales, que aproximadamente el 90% de todos los cambios ocurren durante ese porcentaje pequeño del tiempo cuando el flujo iguala o excede la descarga dominante.

La propiedad más significativa de los materiales de que se componen los límites del cauce, es el tamaño de la partícula. Es realmente la propiedad más fácilmente medible, y en general, para muchos propósitos prácticos representa una descripción suficientemente completa de la partícula de sedimento. Otras propiedades como la forma y la velocidad tiende a variar con el tamaño de una manera aproximadamente predecible.

La apariencia del banco es una buena indicación de estabilidad relativa. Una inspección de campo ayudará a identificar características que son asociadas con las tasas de erosión:

- Los bancos inestables con rata de erosión alta normalmente tienen pendientes que exceden el 30%, y una capa de vegetación leñosa es raramente apreciable. Hendiduras que representan los límites de bloques de las depresiones reales o potenciales a lo largo de la línea bancaria indican un potencial para la erosión bancaria muy rápida.
- Los bancos erosionados son una fuente de residuos de árboles que se caen. Por consiguiente, los residuos pueden ser una señal de bancos inestables.
- Los bancos estables con rata de erosión muy lenta tienen pendiente graduada, a casi nula, pendientes de menos del 30%. Los árboles maduros en una cuesta bancaria graduada son evidencia convincente de estabilidad bancaria. Los ríos de montaña poco profundos que transportan el sedimento grueso del lecho, tienden a mantener los bancos estables.

La erosión bancaria activa puede ser reconocida donde se cae o desprende la vegetación a lo largo de la línea bancaria, los huecos a lo largo de la superficie bancaria, los bloques de depresión, los modelos de flujo desviados adyacente a la línea bancaria, vegetación viva en el flujo, aumento de turbiedad, las caras verticales frescas, las barras recientemente formadas inmediatamente río abajo del área erosionada, y, en algunas situaciones, una profunda socavación adyacente al pie del banco.

Los materiales bancarios se relacionan con la resistencia de una banca a la erosión de manera estrecha según las características del material. El material bancario depositado en el cauce puede ser clasificado ampliamente como cohesivo, no cohesivo, y compuesto.

- Material no cohesivo: el material tiende a ser quitado grano por grano del banco. La rata de desprendimiento de la partícula, movimiento de la partícula, y la rata de erosión bancaria, es afectada por factores como el tamaño de la partícula, pendiente bancaria, dirección y magnitud de la

velocidad adyacente al banco, las fluctuaciones de velocidades turbulentas, la magnitud y fluctuaciones en los cortantes ejercidos en los bancos, fuerza de la filtración, conductos, y fuerzas de las olas.

- Material cohesivo: al parecer es más resistente a la erosión y tiene permeabilidad baja que reduce los efectos de la filtración mientras se conduce por micro conductos. Sin embargo, cuando se socava y/o satura, muy probablemente los bancos fallen debido al debilitamiento de la masa.

- Material compuesto o estratigráfico: estos bancos están formados por capas de materiales de varios tamaños, diferente permeabilidad, y cohesión. Las capas de material no cohesivo están sujetas a la erosión de la superficie, pero puede protegerse en parte por las capas adyacentes de material cohesivo. Este tipo de banco también es vulnerable a la erosión y el deslizamiento, como consecuencia de los flujos de agua subterránea y flujo por micro conductos.

5.1.9 Sinuosidad

La sinuosidad es la relación de la longitud de un cauce medida a lo largo de su eje y la longitud medida en línea recta. A veces, la sinuosidad se define como la relación entre la longitud total del thalweg en el tramo de la corriente y la longitud en línea recta, donde el thalweg es el punto más profundo en el cauce. Los cauces rectos tienen una sinuosidad de uno, y el valor máximo de sinuosidad para los arroyos naturales es aproximadamente cuatro.

Hay una pequeña relación entre el grado de sinuosidad y la estabilidad lateral del río. Un río con muchos meandros puede tener una rata más baja de migración lateral que un río sinuoso de tamaño similar (Figura 13). Pero la estabilidad es principalmente dependiente de otras propiedades, sobre todo del desarrollo de barras y la variabilidad de la anchura del cauce.

Los ríos rectos sólo son relativamente estables cuando el tamaño del sedimento y carga son pequeñas, la pendiente, velocidades, y variabilidad de flujo son bajas, y la proporción de ancho-profundidad del cauce es relativamente baja.

Los cauces aluviales de todos los tipos se desvían de una alineación recta formando meandros. El thalweg oscila transversalmente, iniciado la formación de curvaturas. En un río recto, las barras alternadas y los thalweg están cambiando continuamente; así, la corriente no se distribuye uniformemente a través de la sección transversal, y se desvía de un banco a otro. Socavando los bancos, depositando cargas no uniformes en el lecho. Cuando la corriente se dirige hacia un banco, el banco se erosiona en el área de intrusión, y la corriente se desvía y choca río abajo con el banco opuesto. El ángulo de desviación de la corriente es afectado por la curvatura formada en el banco erosionado y la profundidad lateral de erosión.

En general, la erosión del banco es más rápida generalmente en el exterior del meandro, río abajo del ápice de la curva. El atajar un meandro, si es hecho artificialmente o naturalmente, causa un aumento local en la pendiente del cauce y una rata de crecimiento más rápida de meandros en las zonas inmediatas.

5.1.10 Ríos trenzados

Un río trenzado consiste en el entrelazando de sus múltiples cauces (Figura 13). En general, un cauce trenzado tiene una pendiente grande, una carga grande de material de lecho comparado con su carga suspendida, y cantidades relativamente pequeñas de limos y arcillas en el lecho y bancos. La magnitud de la carga del lecho es más importante que su tamaño. Si el flujo se carga excesivamente con el sedimento, la deposición ocurre junto con la agradación del lecho, y la pendiente del cauce aumenta en un esfuerzo para obtener la condición del equilibrio. Cuando el cauce se empina, la velocidad aumenta, y los cauces múltiples se desarrollan. Generalmente

se forman los cauces múltiples con las barras de sedimento y depósitos dentro del cauce principal, mientras causan el ensanchamiento del sistema global del cauce.

Las múltiples islas en medio del cauce y barras son características de ríos que transportan grandes cargas de lecho. La presencia de barras obstruye el flujo y la erosión ocurre.

El grado de trenzado del cauce se indica por el porcentaje de longitud en el que el río es dividido por las barras e islas, como se muestra en Figura 13.

5.1.11 Ríos con brazos divergentes (anabranched)

Un río con brazos divergentes difiere de un río trenzado en que el flujo es dividido por las “islas” en lugar de las barras, y las “islas” son relativamente grandes para encauzar la anchura del cauce. Los brazos divergentes, o los cauces individuales, son más amplios, están claramente separados y presentan un mejor arreglo en la posición que las trenzas de un río trenzado.

El grado de brazos divergentes se categoriza arbitrariamente en la Figura 13, de la misma manera como el grado de trenzado que ya se describió.

5.2 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE INESTABILIDAD DEL RÍO

Un río estable no cambia de tamaño, forma, o posición con el tiempo; sin embargo, los cauces aluviales cambian de magnitud y son algo inestables. Los tipos de cambios, motivo de preocupación son:

- La erosión bancaria lateral, incluso la erosión que ocurre de la migración del meandro.
- Agradación o degradación del lecho, que progresa con tiempo.

- Las fluctuaciones a corto plazo en elevación del lecho, que es normalmente asociada con el paso de una avenida extrema (erosión y llenado).

Estos cambios son asociados con la inestabilidad en un sistema del arroyo o en un alcance extenso de arroyo.

La inestabilidad local causada por la construcción de una carretera que cruza o la invasión en un río, también es preocupante. Esto incluye erosión causada por la reducción del flujo, y erosión local causada por perturbación de los perfiles aerodinámicos con objeto en el flujo, como un malecón o un estribo. El propósito de este segmento es presentar los procedimientos de análisis que pueden utilizarse para evaluar la inestabilidad del río.

5.2.1 Procedimiento general de solución

El análisis de cualquier problema complejo debe empezar con una apreciación global o la evaluación general, incluso una *valoración cualitativa* del problema y su solución. Este fundamental paso inicial debe dirigirse hacia proporcionar la visión y entender de procesos físicos significantes, sin estar demasiado interesado por cualquier componente específico del problema. La comprensión que generan tales análisis asegura que los análisis detallados subsecuentes se diseñan apropiadamente.

El análisis cualitativo debe estar seguido con análisis cuantitativos que usan hidrología básica, hidráulica y conceptos de ingeniería de transporte de sedimentos. Tales análisis podrían incluir evaluación de avenidas históricas, condiciones hidráulicas del cauce, análisis básicos de transporte de sedimento como la evaluación de la rata de producción de sedimento de la cuenca, el análisis del movimiento incipiente y cálculos de erosión. Éste análisis puede ser considerado adecuado para muchas situaciones si los problemas son resueltos y las relaciones entre los diferentes factores de estabilidad se explican adecuadamente. Si no, debe ser considerado un

análisis cuantitativo más complejo basado en los modelos hidráulicos, físicos y/o matemáticos detallados.

En resumen, el procedimiento general de solución para analizar la estabilidad del río, podría involucrar a lo siguiente tres niveles de análisis:

Nivel 1: Aplicación de conceptos simples de geomorfología y otros análisis cualitativos.

Nivel 2: Aplicación de hidrología básica, hidráulica y conceptos de ingeniería de transporte de sedimentos.

Nivel 3: Aplicación de modelados matemáticos o físicos.

5.2.2 Análisis geomorfológico cualitativo (nivel 1)

Un diagrama de flujo de los pasos típicos en los análisis geomorfológicos cualitativos se presenta en Figura 14. Los seis pasos son generalmente aplicables a problemas de estabilidad de ríos. Como se muestra en Figura 14, la evaluación cualitativa lleva a una conclusión con respecto a la necesidad de hacer un análisis más detallado (Nivel 2) o una decisión para completar una filtración y evaluación basada en el análisis de nivel 1.

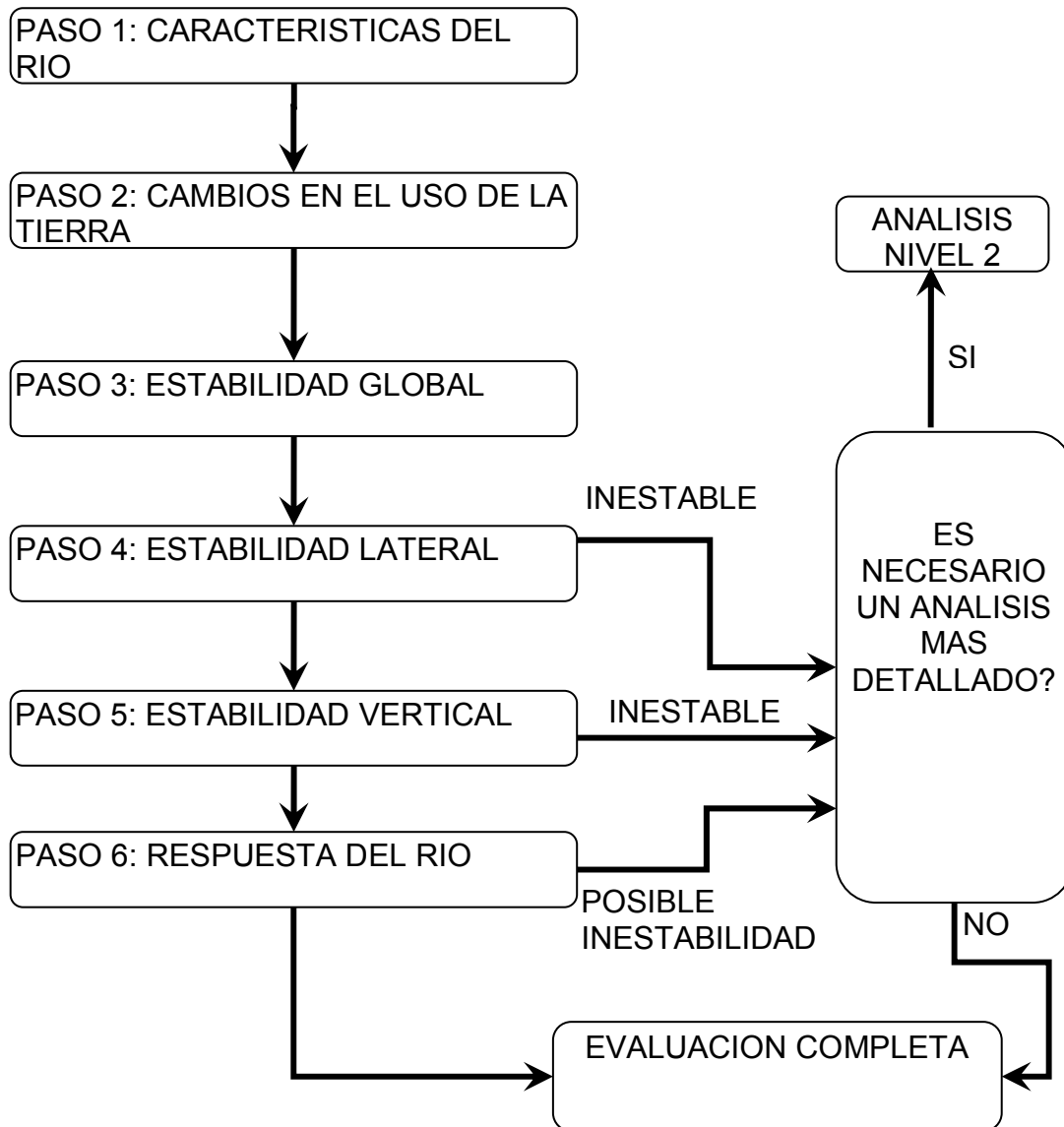


Figura 14. Diagrama de flujo para un análisis de nivel 1

5.2.3 Análisis geomorfológico cualitativo general del río de oro.

Para este trabajo solo se evaluarán los cuatro primeros pasos, ya que los pasos cinco y seis, requieren de un conocimiento de ingeniería de transporte de sedimentos y un seguimiento histórico del perfil del lecho del río.

- **Paso 1. Definición de las características del río:**

Este primer paso consiste en identificar las características del río según los factores discutidos en el numeral 5.1. Definiendo estas características geomorfológicas del río, se brinda una visión de la conducta del río y la contestación ante eventos extremos.

- *Tamaño del río:* según la clasificación de referencia, el río corresponde a un río de tamaño pequeño, ya que a todo lo largo del mismo a excepción de aguas abajo de Puente Flandes donde existen zonas con un ancho superior a 30m. Según Vide (1997) [8], en ríos pequeños, juega un papel importante la vegetación, ya que la misma no guarda proporción con el tamaño del río y sí juega un papel importante en la morfología, ya que las secciones fluviales resultan de la interacción del agua, los sólidos y la resistencia ofrecida por la vegetación, tanto en sentido de la resistencia al flujo (rugosidad) como de resistencia ante el arrastre de material aluvial.

- *Habito del flujo:* se clasifica como perenne.

- *Material del lecho:* según la clasificación de la Figura 13. el material predominante son las arenas gruesas “gravas”. Con base en las granulometrías que se presentan en el anexo C y según la clasificación unificada de suelos, el material se clasifica como gravas arenosas.

- *Escenario del valle*: las pendientes estimadas para la lamina de agua, en el estudio de Geotecnología, no sobrepasan del 1,4%, lo cual sumado a la topografía observada en planos y salidas de campo, ubican este río como tipo aluvial.

- *Planicies de inundación*: la condición predominante en los primeros 10Km del río, es la ocupación de las planicies de inundación, por parte de urbanizaciones, asentamientos humanos y tierras cultivadas. Si se toma como referencia las líneas de inundación registradas tras el evento de febrero, donde el río inundo barrios como Arenales IV, Parque Gallineral, José A Galán, 5 de Mayo, El Poblado, entre otros, se podría decir que el río se clasifica como estrecho.

- *Diques naturales*: hay presencia de diques o barras laterales, en el sector comprendido entre el PR 10+600 al PR 14+500. El río se clasifica como un río de pocos diques.

- *Incisión visible*: en la zona alta del río, las riveras han sido modificadas por procesos antrópicos, es común encontrar bancas altas, pero conformadas por rellenos de orden antrópico. En la zona baja del río (aguas abajo del PR 10+000), que es una de las zonas con menor intervención, y de la cual se puede decir que conserva en cierta parte una morfología que obedece a procesos naturales, predominan bancas con alturas dentro de las normales.

De acuerdo con esta sectorización, se clasifica el río como de –altas probabilidades de incisión- en la zona alta, y de baja probabilidad de incisión en la zona baja.

- *Limites del cauce y vegetación:* a lo largo del río predomina el lecho *aluvial*, excepto en el sector de Vahondo, sector 7 y 8, donde hay afloramientos de la formación Girón.

En general, hay presencia de vegetación en los bancos, precedida en la mayoría de los casos, de material de arrastre.

- *Sinuosidad:* se estimó este parámetro dividiendo en dos tramos el río, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 7. junto con la clasificación.

TRAMO	SINUOSIDAD	CLASIFICACION
PR 0+050 A PR 5+700	1,29	Meandrico
PR 5+700 A PR 15+700	1,13	Sinuoso

Tabla 7. Evaluación de la sinuosidad del Río de Oro

- *Arroyos trenzados:* se estimó el porcentaje de trenzamiento del río en 4.7%, lo cual ubica al río dentro del tipo no trenzado. Esta estimación se hizo midiendo en planos la longitud total de barras a lo largo del río y expresándola en porcentaje de la longitud del tramo estudiado (15.7Km).

- *Brazos divergentes:* se estimó el porcentaje de brazos divergentes en un 16.2%, por tanto el río se caracteriza como localmente de brazos divergentes. La metodología empleada fue la misma utilizada para medir el grado de trenzamiento.

• Paso 2. Cambios en el uso de la tierra:

Quizás el cambio más notable en el uso de la tierra y de mayor impacto en la cuenca del río de Oro, es la urbanización formal y los asentamientos en la rivera del río. No siendo de menor importancia, otros factores como lo son la explotación de agregados pétreos y las prácticas agrícolas.

Aunque corresponde a un estudio de nivel 2., el impacto que tiene la urbanización de la cuenca, lo que si se puede asegurar según Vide (1997), es que la urbanización aumenta el flujo máximo como consecuencia de la impermeabilización del suelo y el encauzamiento de las aguas lluvias, disminuye o aumenta la rata de aporte de sedimentos de la cuenca al río, situación que como ya se menciono anteriormente inicia un proceso de desequilibrio (ver Figura 15) en el cauce, que conlleva a erosión o acreación del mismo.

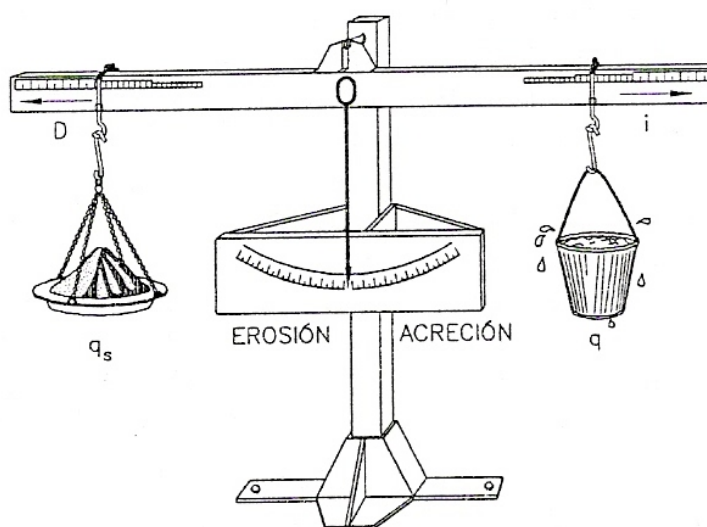


Figura 15. Analogía de la balanza de Lane (1955)

Caudal sólido unitario (q_s). Caudal líquido unitario (q).

Pendiente del fondo (i). Tamaño del sedimento (D)

En el evento de febrero de 2005, se evidencio la tendencia del río por discurrir por las tierras (planicies de inundación) que fueron suyas y que como parte del cambio de uso de la tierra, se le han venido arrebatando. En la Figura 16. extraída de la presentación (9-PPT-B-EVENTOS de 2005) del Ingeniero Jaime Suárez [9], se aprecia a manera de esquema, como la inundación de 1973 se abrió paso por entre varios barrios de Girón, en especial por El poblado, que es un barrio edificado sobre el antiguo cauce del río, el cual fue modificado años atrás. Cotas similares de inundación se registraron en el 2005.



Figura 16. Inundación de 1973. Tomada de 9-PPT-B-EVENTOS.
Suárez (2005)

• **Paso 3. Estabilidad global:**

Como se mencionó en el aparte 5.1.3, las más grandes profundidades de erosión normalmente se encuentran en ríos que tienen lecho de arena. En general, ríos aluviales (lecho arenoso) son menos estables que los ríos con lecho grueso o cohesivo. Adicionalmente los ríos aluviales, exhiben más problemas debido a la erosión lateral en los cauces.

Según Suárez (2001), en corrientes maduras la erosión de fondo del cauce durante una avenida es sólo momentánea pues al disminuir la velocidad del agua, se recupera nuevamente los sedimentos. Estos procesos repetitivos de socavación, transporte y resedimentación controlan en buena parte el comportamiento del río.

En la Tabla 8. se presenta la interpretación de algunos de los parámetros geomorfológicos observados en el río de oro, marcando con una (X) la influencia de cada parámetro en la estabilidad del río.

Interpretación de los parámetros observados				
Condición Observada	Respuesta del canal			
	Estable	Inestable	Degradación	Agradación
Valle Aluvial				
Río arriba		X		X
Río abajo		X	X	
Represas o sitios de represamiento				
Río arriba		X		X
Río abajo		X	X	
Forma del río				
Meandrónico	X	X	No se sabe	No se sabe
Recto				
Trenzado				
Erosión en bancas		X	No se sabe	No se sabe
Vegetación en bancas		X	No se sabe	No se sabe
Incisiones visibles		X	No se sabe	No se sabe
Desviaciones				
Canalización	X		X	
Deforestación en la cuenca	X		No se sabe	No se sabe
Periodos de lluvias	X		X	
Tamaño del material del lecho				
Aumentó		X		X

Tabla 8. Interpretación de los datos observados.

• Paso 4. Estabilidad lateral:

La estabilidad lateral, esta marcada por las propiedades de los materiales que componen las bancas. En el río de oro se aprecia en el sector de Vahondo un control geológico como lo es la formación Girón, la cual esta compuesta por limonitas de baja erodabilidad. El resto del cauce esta enmarcado por material aluvial y rellenos antrópicos, materiales muy erodables y de composición variable (es el caso de los rellenos).

Sumado a lo anterior, el hecho de que los rellenos tengan alturas considerables y que no posean vegetación, genera condiciones de inestabilidad lateral. Condiciones que se evidenciaron en el evento del 2005 (véase el numeral 6.1).

5.3 DINÁMICA DEL RÍO DE ORO

Según la clasificación geomorfológica efectuada, se tiene que los primeros 5.7Km el río presenta un comportamiento meandrónico. Según Suárez (2001) la modificación antrópica de un meandro bien sea por la construcción de obras de protección lateral o rectificación, genera inmediatamente una modificación en la dinámica general del río en la zona intervenida.

Suárez también asegura que uno de los elementos antrópicos que más efectos tiene sobre la erosión y la dinámica fluvial es la construcción de puentes, contrayendo la sección de la corriente de agua. El puente genera represamiento del flujo y redireccionamiento de la corriente generando erosión tanto aguas arriba como aguas abajo. La construcción de un puente genera un direccionamiento del flujo hacia aguas abajo, modificando la hidráulica local sustancialmente.

Partiendo de las condiciones expuestas. Se puede ver que durante el evento del 2005, el río inundó el barrio el Poblado, al traslapar planos de dinámica y planos de inundación, es apreciable la tendencia del río por recuperar el cauce natural, que fuese modificado años atrás como una medida por salvaguardar el barrio el Poblado.

En la figura 17. extraída de (9-PPT-B-EVENTOS de 2005) del Ingeniero Jaime Suárez, se presenta el cauce actual del río de Oro y con línea punteada se señala su antiguo cauce.



Figura 17. Cauce actual y antiguo cauce. Tomada de 9-PPT-B-EVENTOS. Suárez (2005)

6. PROCESOS DE EROSION EN LAS RIBERAS DEL RIO DE ORO

El movimiento del flujo que circula por el cauce de una corriente produce el desprendimiento y transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado. En una cañada o río pueden ocurrir dos tipos de erosión:

- Erosión lateral que amplía su ancho, aumentando la altura de las bancas o taludes.
- Profundización del cauce o erosión del lecho.

La erosión en ambos casos depende de las características geotécnicas de los materiales del fondo y las bancas, su geometría, pendiente y características del flujo. La estabilidad de las bancas depende de los parámetros de resistencia (c' , ϕ'), el peso unitario, la altura, pendiente y la presencia y características de discontinuidades geológicas.

En este capítulo se identificarán las zonas del cauce en donde existían o se han activado procesos de erosión que pongan en riesgo el equilibrio natural del río.

La metodología utilizada para este análisis fue la siguiente:

1. Se realizó un inventario de los principales sitios en los cuales se detectaron procesos de erosión, después del evento registrado en febrero de 2005, este inventario se realizó en el mes de Abril de 2005.
2. Se hizo un seguimiento de estos procesos con el fin de observar su evolución a través de fotografías tomadas en diferentes fechas para analizar la inestabilidad lateral de los taludes.

6.1 INVENTARIO DE LOS PRINCIPALES SITIOS EN LOS QUE SE DETECTARON PROCESOS DE EROSIÓN

FOTO 2. SITIO 1



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: Relleno Vía a Zapatota.

Comentarios: Erosión lateral del terraplén de la vía.

FOTO 3. SITIO 2



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: Talud frente al Barrio las Marías.

Comentarios: Erosión en el pie del talud.

FOTO 4. SITIO 3



Fecha de la fotografía: 27 de Abril de 2005

Localización: Talud Sagrado Corazón.

Comentarios: Socavación en el pie del talud.

FOTO 5. SITIO 4



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: Relleno Castilla Real.

Comentarios: Erosión lateral del relleno.

FOTO 6. SITIO 5



Fecha de la fotografía: 28 de Abril de 2005

Localización: Rellenos barrió San Antonio del Carrizal.

Comentarios: Erosión lateral del relleno.

FOTO 7. SITIO 6



Fecha de la fotografía: 28 de Abril de 2005

Localización: Talud frente a Solla.

Comentarios: erosión lateral talud.

FOTO 8. SITIO 7**Fecha de la fotografía:** 28 de Abril de 2005**Localización:** Talud frente al Barrio Convivir.**Comentarios:** Erosión en el pie del talud.

6.2 EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE EROSION.

La evolución de los procesos de erosión es un factor determinante en la estabilidad de las estructuras de protección que existen o que se proyecten en las zonas aledañas al sitio afectado.

El alcance de este objetivo es realizar un seguimiento a la evolución de los procesos erosivos, que se presentaron en el talud conocido como “curva del sagrado corazón”. Este talud está ubicado entre el PR 1+800 y el PR 2+150, sobre la margen derecha del río de oro, frente al barrio Santa Cruz. Se escogió este talud con el fin de observar cómo los procesos erosivos han afectado la estabilidad del mismo.

- **Inestabilidad lateral**

Según Suárez (2001), la inestabilidad lateral de los cauces puede deberse a la profundización de los mismos o a un proceso de dinámica morfológica de la corriente. La dinámica natural de la corriente genera modificaciones tanto en la planta como en la sección de las corrientes.

Adicionalmente a la inestabilidad dinámica propia del río pueden ocurrir deslizamientos de los taludes por inestabilidad geotécnica de los mismos o erosión por las corrientes de escorrentía que fluyen hacia el río.

El proceso de inestabilidad lateral de una corriente depende de sus características hidráulicas, morfológicas, y de sedimentos así como de la geología, la vegetación y el uso del suelo de las orillas.

El resultado es una profundización del cauce pudiéndose producir inestabilidad y falla de los taludes laterales. Un fenómeno muy común de erosión en las riberas de los ríos es la erosión interna debida a los ascensos y descensos de los niveles del río. Al bajar el nivel del río se produce un movimiento de agua subterránea desde el suelo del talud de la orilla hacia la corriente. Este movimiento puede generar el transporte de partículas, la socavación y el colapso generándose deslizamientos de bloques de talud, aún a velocidades muy bajas de la corriente.

Un resultado típico de esto, es la formación de una topografía en gradas del talud de la orilla, las capas de suelos limosos y arenosos se erosionan mucho más fácilmente que las de suelos más cohesivos.

La extensión de esta erosión depende de la duración del evento de nivel de aguas altas y de la rapidez del descenso de los niveles de la corriente, de la inclinación de los mantos y de la textura de los materiales.

De acuerdo a lo anterior las principales características del talud en estudio son las siguientes:

- El talud del sagrado corazón esta ubicado en la parte externa de una curva de gran radio, lo que hace que en estos sitios se presenten las mayores profundidades de socavación debido a la línea del thalweg y las corrientes secundarias, las cuales ocurren en el plano normal al eje del flujo principal. Estas corrientes aparecen tanto en las rectas como en las curvas, pero son mayores en las curvas.
- Los materiales que conforman el talud erosionado corresponden a materiales aluviales del miembro Órganos inferior los cuales son generalmente muy resistentes a la erosión; sin embargo las altas velocidades alcanzadas por el flujo de la inundación lograron erosionar un tramo importante de talud.
- El talud del sagrado corazón no presenta cobertura vegetal, debido a la alta pendiente del terreno.
- Hacia aguas abajo de la curva del sagrado corazón se encuentran con frecuencia personas “areneros” que extraen material del fondo del río, cabe anotar que esta actividad no es reciente. La extracción del material del lecho, debido a su gran magnitud y duración puede ser equivalente a una interrupción total del transporte sólido hacia aguas abajo.
El efecto de esta actividad, es un río en esfuerzo por recupera un equilibrio natural, generándose hacia aguas arriba un descenso del fondo, que aumenta la rata de socavación del talud ya que el pie de este se debilita por la pérdida de material de fondo.
- El hecho que el ancho del cauce del río en este sector se haya disminuido a través de los años, por la construcción de viviendas sobre las antiguas

planicies de inundación del río, representa un cambio en la morfología local del río, que hace que tanto la línea del thalweg como las bancas del río se muevan cada vez mas hacia el talud, aumentando los procesos de erosión.

FOTO 8



Fecha de la fotografía: Izquierda 27 de Abril. Derecha 17 de Junio de 2005

Localización: Talud del sagrado corazón

Comentarios: Evolución del proceso de erosión.

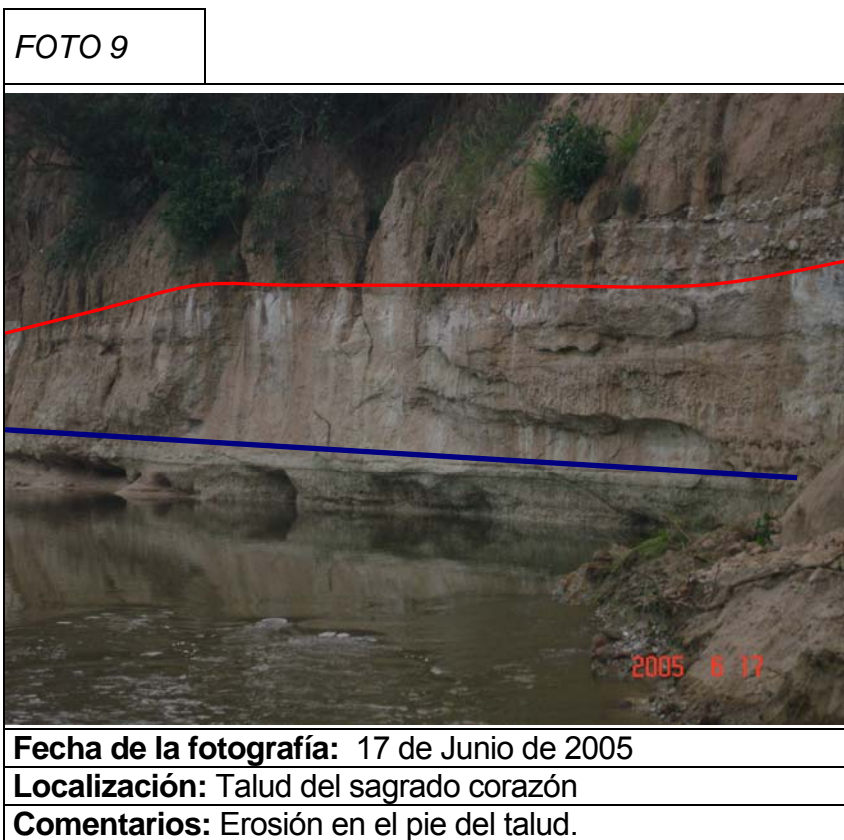
6.1.1 Seguimiento de los procesos de erosión

El seguimiento fotográfico del talud de la curva del sagrado corazón, permitió determinar que la socavación en el pie del talud producto de la crecida de febrero de 2005, activo procesos de erosión en talud.

En la Foto 8, fotografía de la izquierda, del día 27 de abril de 2005 se puede observar como los mantos inferiores del talud, conformados por el miembro órganos fino, presenta una socavación marcada en el pie del mismo, de igual

forma hay evidencia de antiguos desprendimientos de bloques. La fotografía de la derecha, tomada el día 17 de junio de 2005, 2 meses y medio después, muestra un gran deslizamiento del talud que obstruyó la totalidad del cauce del río de oro.

Este proceso se presenta en la formación órgano inferior.



La Foto 9. muestra la estratigrafía del talud; la línea roja representa el contacto entre el miembro órganos grueso y el miembro órganos fino. La línea azul, representa el nivel actual de socavación del talud, el cual esta hasta 1.0m por encima de la lamina de agua.

Aunque la formación órganos inferior, por estar compuesta de materiales cohesivos con velocidades de erosión muy altas, y considerarse poco erodable,

no resistió las altas velocidades del flujo que pueden generar fatiga e inestabilidad interna de las capas más superficiales, generando una socavación lenta de los estratos inferiores de la formación, es decir erosionando el pie del talud.

Si estos procesos continúan tanto en magnitud como en velocidad, es posible que todo el manto del miembro órganos fino se socave por completo, poniendo en riesgo la estabilidad global del talud.

CONCLUSIONES

El 25% de las estructuras inventariadas de el tramo en estudio, sufrieron destrucción total, el 17% sufrieron destrucción parcial.

El 80% de las estructuras que sufrieron destrucción total o parcial, se encontraban cimentadas sobre suelos aluviales.

El 70% de las estructuras que sufrieron destrucción total o parcial, son estructuras del tipo gavión con recubrimiento en concreto, siendo esta el tipo de estructura que predomina en un 58%, a todo lo largo del tramo en estudio.

Las profundidades de socavación estimadas resaltan el buen grado de ajuste que presenta la fórmula obtenida a partir del método de Lischtvan y Lebediev y modificada por Maza, al compararlos con las evidencias y comportamientos que dejó el evento de febrero de 2005. De este análisis se puede ver que la ecuación de Laursen subestima las profundidades de socavación, en la mayoría de los casos. Esto resulta lógico ya que el planteamiento de esta ecuación considera la hipótesis que el agua es clara; es decir, sin transporte de sedimentos y además rugosidad uniforme del cauce.

El lecho del Río de oro está conformado principalmente por sedimentos de tres tipos de materiales como lo son: depósitos aluviales recientes, compuestos principalmente por gravas arenosas bien gradadas con porcentajes de finos inferiores al 5% que se clasifican como GW, GM, SW, SM, GW-GM y SW-SM.

Materiales más finos en el fondo del cauce, compuestos por arcillas y limos arcillosos, bloques y guijarros mayores a 15cm de diámetro.

La estabilidad de las estructuras de protección cimentadas sobre depósitos aluviales, no se vio afectada cuando estas unidades geológicas están compuestas superficialmente de guijarros y bloques con tamaños entre 10.0cm y 15.0cm. Cuando los materiales del lecho están compuestos por arenas finas a medias y gravas finas, se esperan profundidades de socavación entre 0.70m y 2.80m, que pueden poner en riesgo la estabilidad de las estructuras si estas no están cimentadas a profundidades superiores a 3.0m.

Los parámetros geomorfológicos que caracterizan el río de Oro, describen un cauce sensible y poco estable, propenso a seguir sufriendo cambios morfológicos drásticos de no frenar la intervención antrópica del mismo.

Se recomienda instrumentar la cuenca del río de Oro con el fin de registrar la información necesaria para realizar análisis de nivel dos y tres, que permitan estimar la evolución del río y tomar así las medidas correctivas que mitiguen los daños al cauce.

A partir de las zonas del río con procesos de erosión identificados, se puede afirmar que no solo la formación órganos superior es altamente erodable, como comúnmente se creía, también lo es la formación órganos inferior. De esta ultima se identifico un patrón de avance de la erosión caracterizado por una lenta pero progresiva socavación del pie de los taludes, debido a las altas velocidades del flujo que generan fatiga e inestabilidad interna, seguido por la formación de fosas de magnitud considerable, que llevan a la activación de deslizamientos que ponen en riesgo el equilibrio natural del río.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Documento Diagnostico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río Oro realizado por GEOTECNOLÓGIA LTDA para la CDMB.
- [2] MAZA, José A. Introduction to River Engineering. Universitá Italiana per Stranieri. Perugia, Italia. 1993
- [3] Publicación No. FHWA NHI 01-003, Hydraulic engeneering circular No. 23. US Department of Transportation. 2001
- [4] LAUSER, E.M Análisis of relief bridges scout. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.89, HY. 1963
- [5] FRIPP, J. B., DIPLAS, P. Surface sampling in gravel stream. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 1993
- [6] SUÁREZ, J. Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2001.
- [7] Stream stability at highway structures HEC-20 (Third Edition). US Nacional Highway Institute. 2001
- [8] VIDE, M. Ingeniería de ríos. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España, 2001.
- [9] SUÁREZ, J. (9-PPT-B-EVENTOS). Clase de estabilidad de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2005.

ANEXOS

ANEXO A

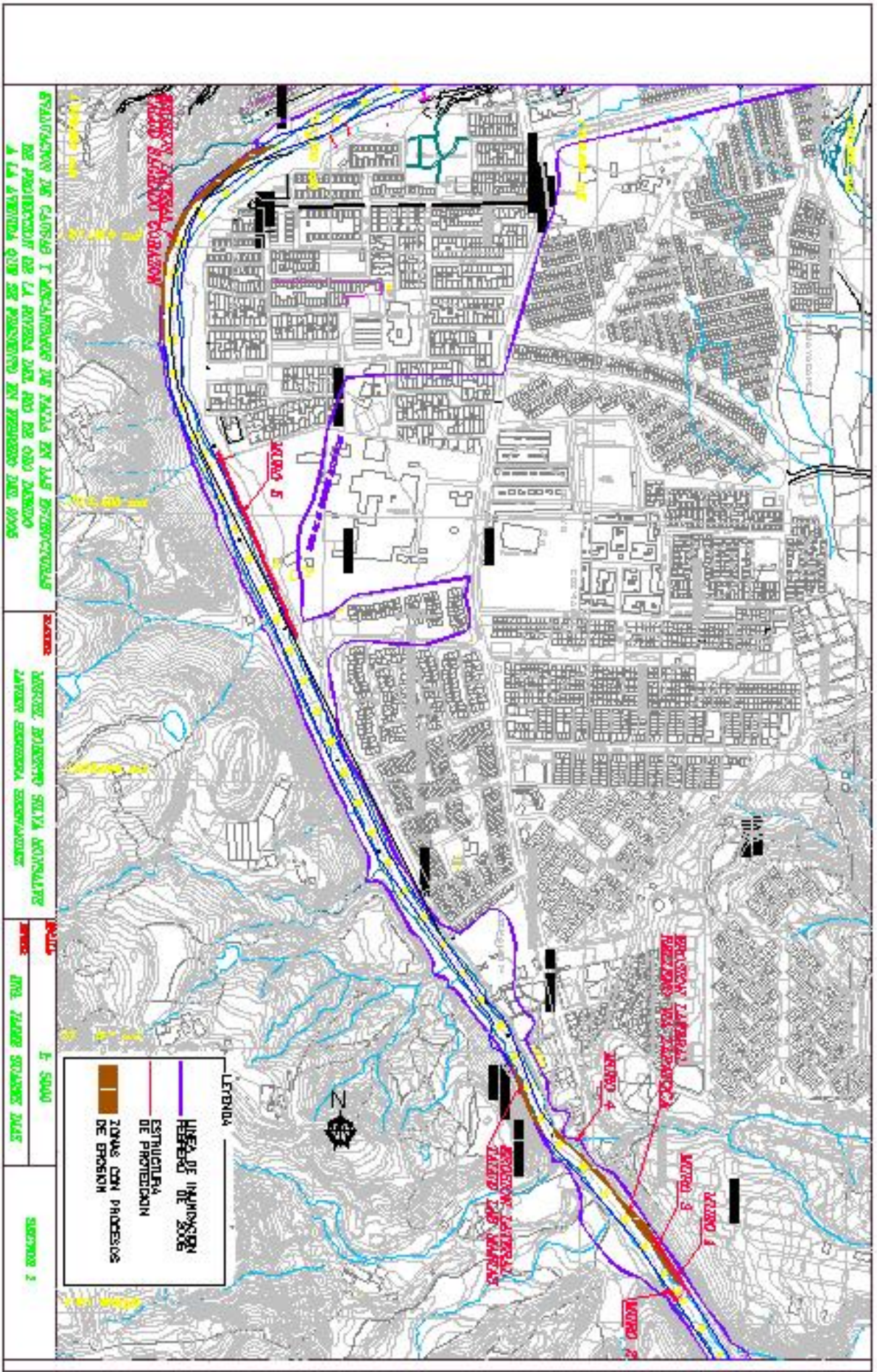
**MATRIZ RESUMEN: INVENTARIO DE LAS
ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE LA RIVERA DEL
RÍO DE ORO UBICADAS ENTRE LOS PR 0+0.00 Y PR
11+750**

MATRIZ RESUMEN: INVENTARIO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE LA RIVERA DEL RÍO DE ORO UBICADAS ENTRE LOS PR 0+0.00 Y PR 11+750

Localización	Ojeto del muro	Tipo de muro	Dimensiones (m)		Cimentación	Comportamiento durante el evento	Características del proceso de erosión
Sector 1 - Bahondo a Parque Gallineral							
• PR 0 +165 BATEA BAHONDO (margen derecha)	Contenedor de relleno y protección de estribo.	Concreto ciclópeo.	Largo: 51 Alto: 2.4		Sobre la formación Girón.	En pie.	Presenta socavación de la base cerca al estribo de la batea.
• PR 0+165 BATEA BAHONDO (margen izquierda)	Contenedor de relleno y protección de estribo.	Concreto ciclópeo.	Largo: 20 Alto: 1.4 a 2.6		Sobre la formación Girón.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
• PR 0 + 250 VÍA ZAPATOCA (margen derecha)	Contenedor de relleno.	Gavión.	Largo: 50 Alto: 2		Sobre material aluvial.	Dstrucción total.	Socavación en la base y formación de fosa entre el relleno y los gaviones.
• PR 0 + 450 BARRIO LAS MARIÁS (margen derecha)	Contenedor de relleno.	Gavión.	Largo: 8.5 Alto: 4.4		Base en concreto ciclópeo soportada sobre un relleno antropico.	Dstrucción total.	Desalojo del material de relleno en la base del cimiento, esta socavación hizo que parte del cimiento quedara en voladizo y que el muro se partiera, lo cual permitió la socavación en la totalidad del relleno al cual servia de contención. .
• PR 1 +250 TREFILCO (margen derecha)	Contenedor de relleno.	Gavión.	Largo: 300 Alto: 2		Base en concreto ciclópeo.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
Sector 2 - Parque Gallineral al Poblado							
• PR 2 + 350 MALECÓN (margen izquierda)	Protección contra inundación.	Concreto ciclópeo.	Largo: 200 Alto: 2.2		Base en concreto ciclópeo.	En pie.	Presenta socavación en la base.
• PR 2 + 530 BATEA (margen izquierda)	Protección de estribo.	Concreto ciclópeo.	Largo: 5 Alto: 2		Sobre material aluvial.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
• PR 2 + 530 BATEA-PUENTE LENGUERKE (margen izquierda)	Protección contra inundación, protección de estribo y contenedor de relleno.	Concreto ciclópeo.	Largo: 160 Alto: 1.3		Base en concreto ciclópeo.	En pie.	En de esta estructura no hay evidencias de socavación, ya que hay gran acumulación de material arrastrado por el río, en especial cantos de gran tamaño que sirvieron de protección.
• PR 2 + 700 PUENTE LENGUERKE (margen derecha)	Protección de estribo.	Gavión.	Largo: 4 Alto: 3		Sobre material aluvial.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación. En el sitio se observa que hay una gran depositación de material aluvial, compuesto por arena.
• PR 2 + 710 PROTECCIÓN ESTRIBO (margen derecha)	Contenedor de relleno y protección de estribo.	Gavión.	Largo: 50 Alto: 3		Sobre material aluvial.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
• PR 2 + 720 CASA DE MERCADO (margen izquierda)	Contenedor de relleno y protección de estribo.	Concreto ciclópeo.	Largo: 140 Alto: 5		Sobre material aluvial.	Colapso parcial en un 10% de longitud de la estructura	Se presento socavación en la zona en la cual la cimentación estaba a desnivel; pero se observa una zona aguas abajo en la que no hay socavación ya que hay una depositación de material aluvial.
• PR 2 + 760 BARRIO VILLA CAMPESTRE II (margen derecha)	Contenedor de relleno y protección de estribo.	Gavión.	Largo: 110 Alto: 4,5		Base en concreto ciclópeo.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
• PR 3 + 150 URBANIZACIÓN CASTILLA REAL (margen derecha)	Protección contra la erosión.	Gavión.	Largo: 40 Alto: 2		Base en concreto ciclópeo.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
• PR 3 + 350 BARRIO EL POBLADO (margen izquierda)	Protección contra la erosión.	Gavión.	Largo: 60 Alto: 2		Sobre material aluvial.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación. En el sitio se observa que hay una gran depositación de material aluvial.
• PR 3 + 500 ENTREGA QUEBRADA PADRE JESÚS (margen izquierda)	Contenedor de relleno y protección de obras hidráulicas.	Gavión.	Largo: 73 Alto: 3		Sobre material aluvial.	Colapso parcial en un 30% de longitud de la estructura	Se observa socavación en la base de la estructura.
• PR PR 3 + 730 BARRIO EL CARMEN (margen izquierda)	Protección contra inundación.	Gavión.	Largo: 105 Alto: 6,2		Sobre material aluvial.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
Sector 3 - El Poblado a Saceites							
• PR 4 + 660 COLEGIO JOSÉ ALEJANDRO PERALTA (margen izquierda)	Protección contra inundación y la erosión	Concreto ciclópeo.	Largo: 55 Alto: 2,5		Sobre material aluvial.	En pie.	En la base de esta estructura no hay evidencias de socavación.
• PR 4 + 880 PUENTE PALENQUE (margen derecha)	Protección de estribo.	Gavión.	Largo: 15 Alto: 8		Base en concreto ciclópeo.	Dstrucción total.	Socavación en el material aluvial sobre la cual se apoyaba la base en ciclópeo.
• PR 4 + 895 PUENTE PALENQUE (margen derecha)	Protección contra inundación y contenedor de relleno.	Gavión.	Largo: 100 Alto: 5		Sobre material aluvial.	Dstrucción total.	Socavación por erosión lateral.
• PR 4 + 850 PUENTE PALENQUE (margen derecha)	Protección de estribo y contenedor de relleno.	Concreto ciclópeo.	Largo: 30 Alto: 6		Sobre material aluvial.	Dstrucción total.	Socavación por erosión lateral.
• PR 4 + 880 PUENTE PALENQUE (margen izquierda)	Protección contra inundación y protección de obras hidráulicas.	Concreto ciclópeo.	Largo: 15 Alto: 2		Sobre material aluvial.	En pie.	En algunas partes la base del muro se encuentra socavada y en otras hay grandes depósitos aluviales y material de relleno que la protegen.
• PR 5 + 00 BARRIO SAN ANTONIO DEL CARRIZAL (margen izquierda)	Contenedores de relleno y protectores de obras hidráulicas.	Gavión.	--		Sobre material aluvial, rellenos y formación órganos.	Algunas en pie y otras sufrieron destrucción total.	Tres estructuras cimentadas sobre material aluvial y rellenos antrópicos presentaron socavación, las tres restantes cimentadas sobre la formación órganos no sufrieron socavación.
Sector 4 - Saceites a Parque Industrial 1							
• PR PR 7 + 350 BARRIO JOSÉ A. GALÁN (margen derecha)	Protección contra inundación.	Gavión.	Largo: 370 Alto: 240		Sobre material aluvial.	80 m destruidos, 200 m sepultado bajo material de transporte y 90 m en pie y al descubierto	Para los dos primeros tramos no se pudo realizar inspeccion. El tramos 3 no presento procesos de erosión que afectaran la estabilidad del muro; en algunos sectores se encuentran grandes depósitos aluviales y materiales de relleno sobre la base del muro. .
Sector 6 - Escuela Río de Oro a Parque Industrial 2							
• PR 11 + 750 INCUBADORA SANTANDER (margen derecha)	Contenedor de relleno.	Concreto ciclópeo.	Largo: 48 Alto: 5		Sobre material aluvial.	Dstrucción total.	Socavación en la base de la estructura.

ANEXO B-1

LOCALIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

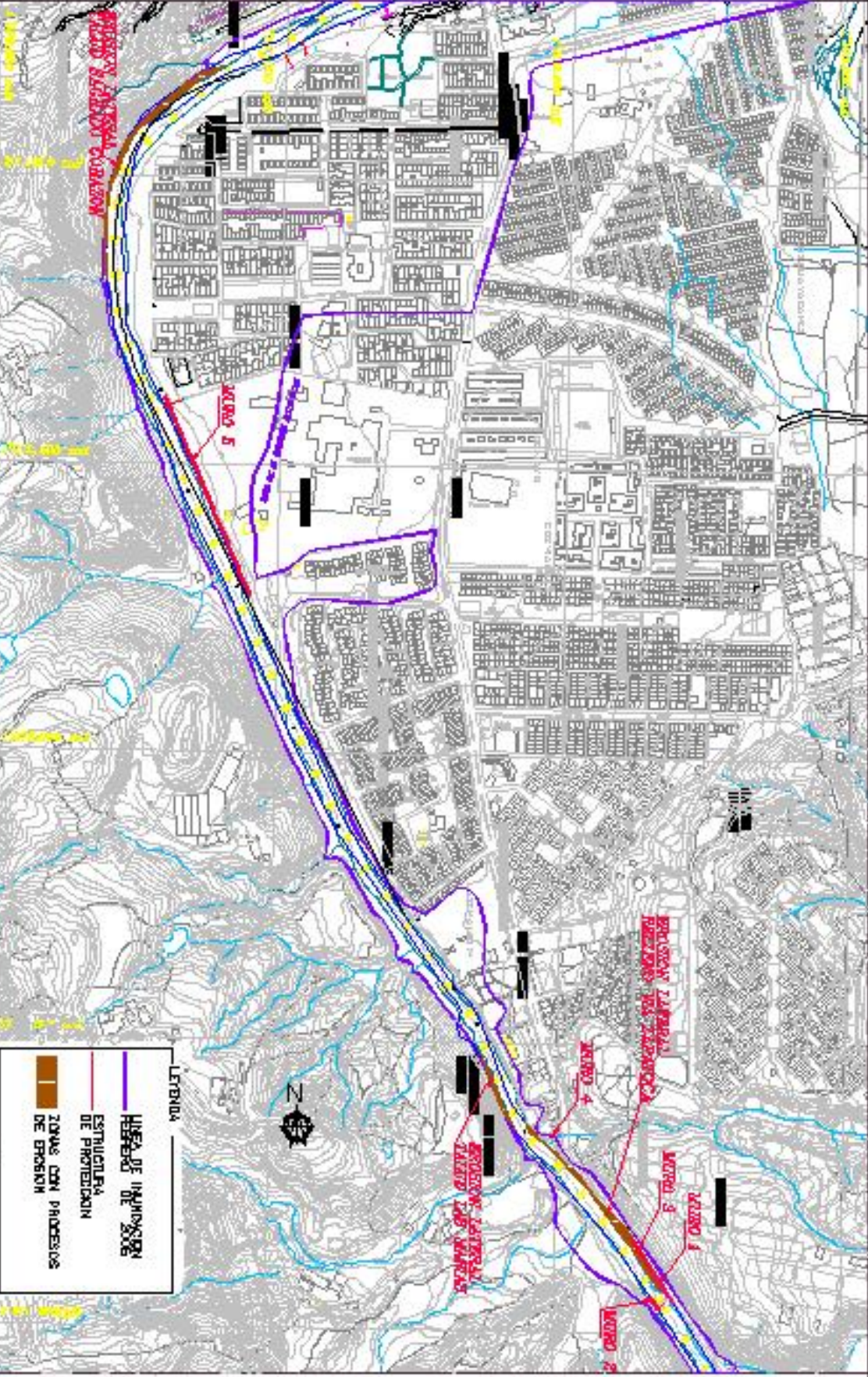


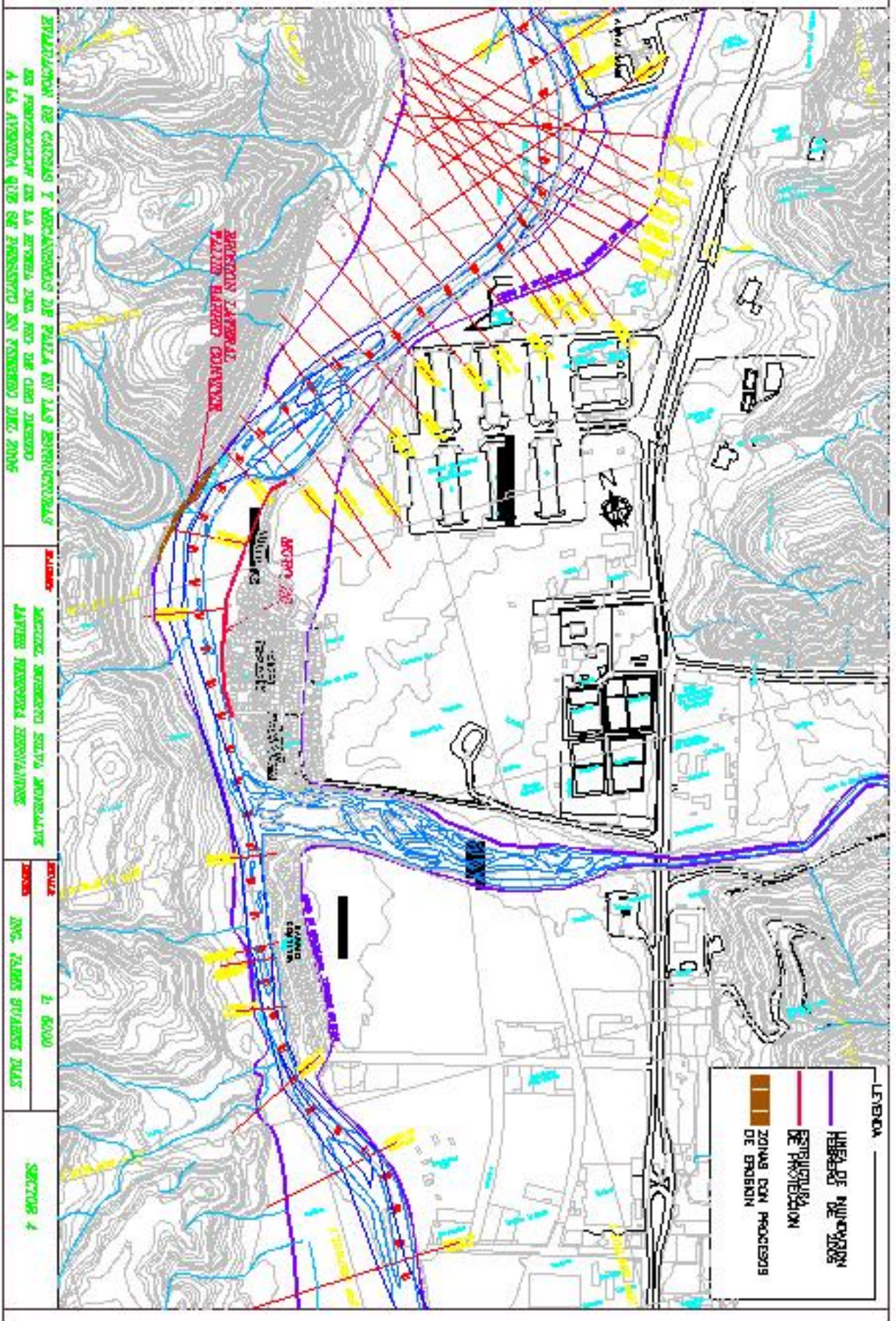
ESTABLECIMIENTO DE CLASIFICACIONES Y MEDICIONES DE LA MALLA EN LAS SECCIONES DE
 PROYECTO DE LA RECONSTRUCCION DEL CANAL DE LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE LA HABANA
 A LA ALTERNATIVA QUE SE PRESENTA EN EL PRESENTE DOCUMENTO

SECCION 5
 SECCION 4
 SECCION 3
 SECCION 2
 SECCION 1




ESCALA 1:5000
 PROYECTO DE OBRAS DE RECONSTRUCCION DEL CANAL DE LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE LA HABANA

LEYENDA
 LINEA DE INUNDACION
 ESTRUCTURA DE PROTECCION
 ZONAS CON PROCESOS DE EROSION
 ZONAS CON PROCESOS DE DEPOSICION





LEYENDA

	LÍMITE DE ZONAS DE PROTECCIÓN
	LÍMITE DE MANEJO DE ZONAS DE PROTECCIÓN
	ZONA CON PROCESO DE DENSIFICACIÓN

SECTOR 4
 1:5000
 ZONA DE MANEJO DE ZONAS DE PROTECCIÓN
 A LA APROXIMACIÓN DEL 2000

SECTOR 4
 1:5000
 ZONA DE MANEJO DE ZONAS DE PROTECCIÓN
 A LA APROXIMACIÓN DEL 2000

SECTOR 4
 1:5000
 ZONA DE MANEJO DE ZONAS DE PROTECCIÓN
 A LA APROXIMACIÓN DEL 2000

SECTOR 4
 1:5000
 ZONA DE MANEJO DE ZONAS DE PROTECCIÓN
 A LA APROXIMACIÓN DEL 2000

ANEXO B-2

REGISTRO FOTOGRÁFICO

MURO No. 1



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 0 +165 (margen derecha)

Comentarios: Obsérvese la rotura del muro justo en la junta con el estribo de la batea.

MURO No. 2



Fecha de la fotografía: 09 de Febrero de 2005

Localización: PR 0+165 (margen izquierda)

Comentarios: El relleno contenido por este muro fue socavado. Aparentemente el muro no presenta socavación en la base.

MURO No. 3



Fecha de la fotografía: 09 de Febrero de 2005

Localización: PR 0+250 (margen derecha)

Comentarios: El relleno contenido por esta estructura fue socavado en su totalidad; el 12 de febrero, la estructura ya debilitada, se presume sufrió socavación en la base y consigo la destrucción total de la misma.

MURO No. 4



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 0+450 (margen derecha)

Comentarios: Se observa la condición de muro en "voladizo" generada por la socavación del relleno antrópico que servía de cimentación a esta estructura.

MURO No. 5



Fecha de la fotografía: 22 de Febrero de 2005

Localización: PR 0+250 (margen derecha)

Comentarios: Aunque el muro en ciclópeo se mantuvo en pie, la parte superior, compuesta de mampostería, no soporto la avenida del 9 de febrero.

MURO No. 6



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 2 + 350 (margen izquierda)

Comentarios: Obsérvese el avanzado estado de socavación en la base del muro.

MURO No. 7



Fecha de la fotografía: 9 de Febrero de 2005

Localización: PR 2 + 530 (margen izquierda)

Comentarios: Centro de la foto, remanso producido por la batea

MURO No. 8



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 2 + 530 (margen izquierda)

Comentarios: Los cantos depositados por el río, sirven de protección a la estructura contra la socavación.

MURO No. 9



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 2 + 700 (margen derecha)

Comentarios: Los cantos y arena depositados por el río, sirven de protección a la estructura contra la socavación.

MURO No. 10



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 2 + 710 (margen derecha)

Comentarios: evidencia de grietas en la cabeza del talud que protege la estructura.

MURO No. 11



Fecha de la fotografía: 27 de abril de 2005

Localización: PR 2 + 720 (margen izquierda)

Comentarios: Apparently the non-cementation to a same level along the structure, was the cause of the failure of this structure.

MURO No. 12



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 2 + 760 (margen derecha)

Comentarios: No se evidencia socavación en la base. El revestimiento de los gaviones ha soportado la abrasión e impactos a los que se ve expuestos la estructura por estar ubicada en curva.

MURO No. 13



Fecha de la fotografía: 27 de Abril de 2005

Localización: PR 3 + 150 (margen derecha)

Comentarios: No se evidencia socavación en la base. Y aunque el nivel de las aguas supero la altura del muro, no se presento socavación en el relleno.

MURO No. 14

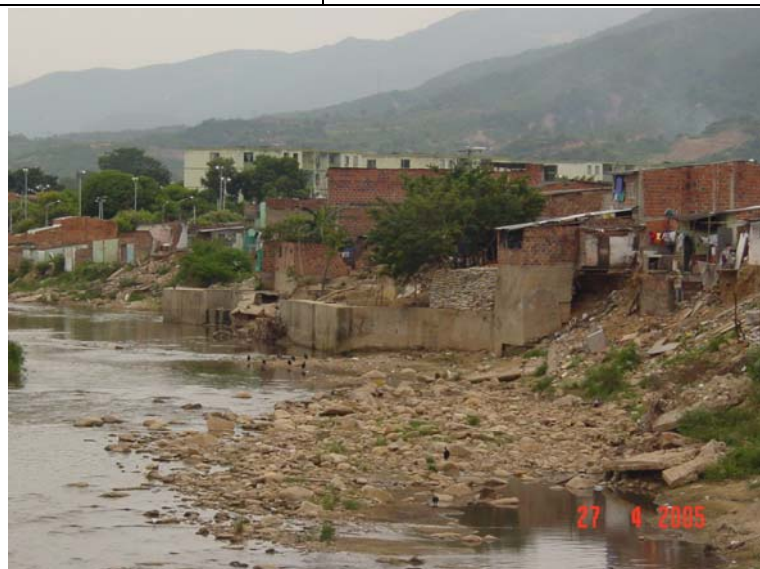


Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 3 + 350 (margen izquierda)

Comentarios: El material aluvial depositado en la base de la estructura, la protege de la socavación. Y aunque el nivel de las aguas supero la altura del muro, no se presento socavación en el relleno.

MURO No. 15



Fecha de la fotografía: 27 de Abril de 2005

Localización: PR 3 + 500 (margen izquierda)

Comentarios: El colapso de la estructura, muy posiblemente se debe a socavación en la base de la misma.

MURO No. 16



Fecha de la fotografía: 27 de Abril de 2005

Localización: PR 3 + 730 (margen izquierda)

Comentarios: Aunque el nivel de las aguas supero la altura del muro, no se vio afectada la estabilidad del mismo. No se aprecia socavación en la base del muro.

MURO No. 17



Fecha de la fotografía: 27 de Abril de 2005

Localización: PR 4 + 660 (margen izquierda)

Comentarios: La estructura no presenta procesos de socavación en la base.

MURO No. 18



Fecha de la fotografía: 28 de Abril de 2005

Localización: PR 4 + 880 (margen derecha)

Comentarios: Obsérvese la progresiva invasión del cause.

MURO No. 19



Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 4 + 895 (margen derecha)

Comentarios: El colapso de la estructura, estuvo gobernado por la socavación lateral, ya que el fondo es la formación órganos.

MURO No. 20



Fecha de la fotografía: 28 de Abril de 2005

Localización: PR 4 + 850 (margen derecha)

Comentarios: La contracción generada por los estribos del puente, indujo a la socavación en la base de la estructura, llevándola al colapso.

MURO No. 21

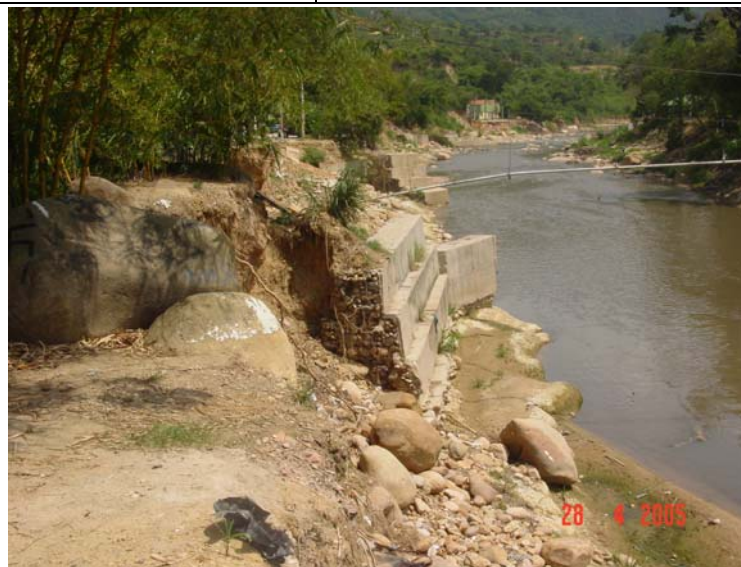


Fecha de la fotografía: 09 de Abril de 2005

Localización: PR 4 + 850 (margen izquierda)

Comentarios: La acumulación sectorizada de material aluvial, protege en gran parte la estructura contra la socavación, sin embargo se encuentran tramos con socavación en la base.

MURO No. 22



Fecha de la fotografía: 28 de Abril de 2005

Localización: PR 5 + 000 (margen derecha)

Comentarios: Obsérvese la socavación lateral del relleno contenido por la estructura; situación que favorece la formación de fosas.

MURO No. 23



Fecha de la fotografía: 26 de Febrero de 2005

Localización: PR 7 + 350 (margen derecha)

Comentarios: Se distinguen las tres condiciones finales de la estructura, de aguas arriba hacia abajo, en su orden son: destrucción total, sepultamiento por material aluvial y estructura sana,

ANEXO C

ENSAYOS DE LABORATORIO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

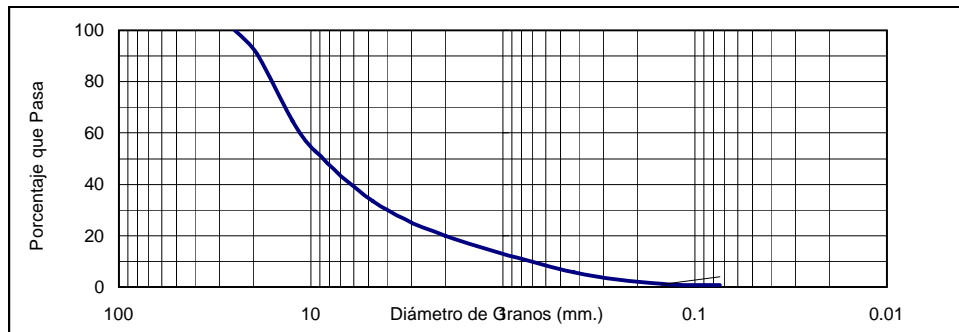
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA.
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	Las Marias	MUESTRA	1	SECTOR	1
--------------	------------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	402.60
W. Tara (grs)	70.10
W. Suelo Seco (grs)	332.50
% Humedad	6.74

CLASIFICACION	
SUCS	GW
Descripción:	Grava bien gradada Color marrón oscuro

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamíz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
1	25.000	0.00	100.00
3/4	19.000	31.00	90.68
1/2	12.500	85.70	64.90
3/8	9.500	40.10	52.84
4	4.760	64.50	33.44
10	2.000	45.10	19.88
40	0.425	47.00	5.74
100	0.149	15.20	1.17
200	0.074	1.00	0.87



Grava = 66.56%

Arena = 32.57%

Finos = 0.87%

D10	0.8995
D30	4.0598
D60	11.2811

Cu	12.5414
Cc	1.6243

Muestra tomada margen izquierda
puente corregidor PR 0 + 216

JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

N.º 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

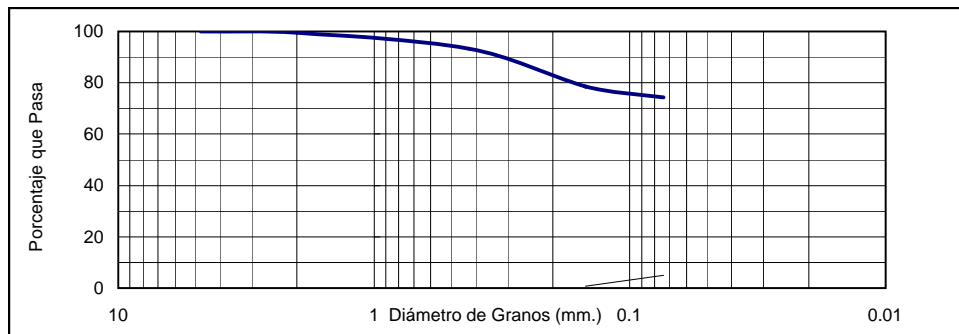
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA.
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	Talud Sta Cruz	MUESTRA	3	SECTOR	1
--------------	----------------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	416.30
W. Tara (grs)	62.10
W. Suelo Seco (grs)	354.20
% Humedad	2.46

CLASIFICACION	
SUCS	CL
Descripción:	Arcilla arenosa Color gris y rojo

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamíz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
4	4.760	0.00	100.00
10	2.000	2.10	99.41
40	0.425	21.70	93.28
100	0.149	52.20	78.54
200	0.074	15.00	74.31



Grava = 0.00%

Arena = 25.69%

Finos = 74.31%

Muestra tomada Barrio Santa Cruz
 Pie de talud margen izquierda PR 1 + 900

 JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

N.º. 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

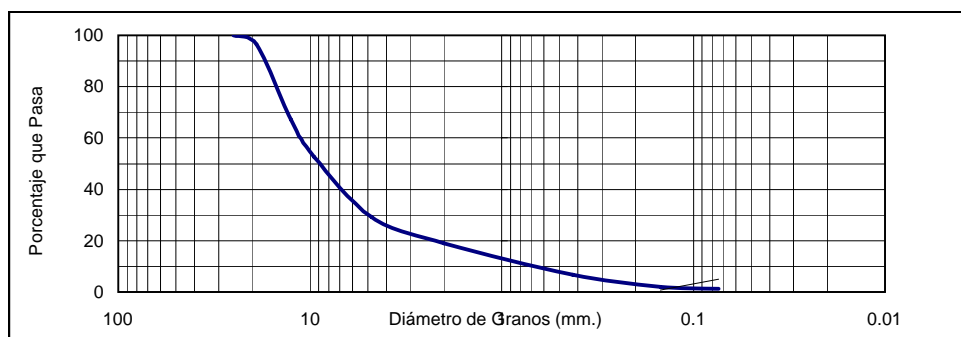
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA.
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	Santa Cruz	MUESTRA	2	SECTOR	1
--------------	------------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	397.40
W. Tara (grs)	66.50
W. Suelo Seco (grs)	330.90
% Humedad	8.34

CLASIFICACION	
SUCS	GW
Descripción:	Grava bien gradada. Color marrón oscuro

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamíz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
1	25.000	0.00	100.00
3/4	19.000	11.50	96.52
1/2	12.500	97.30	67.12
3/8	9.500	47.80	52.67
4	4.760	77.70	29.19
10	2.000	34.20	18.86
40	0.425	40.50	6.62
100	0.149	15.30	1.99
200	0.074	2.10	1.36



Grava = 70.81%

Arena = 27.83%

Finos = 1.36%

D10	0.8599
D30	4.9294
D60	11.0218

Cu	12.8171
Cc	2.5637

Muestra tomada Barrio Santa Cruz
 margen derecha PR 2 + 010

 JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

Nit. 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

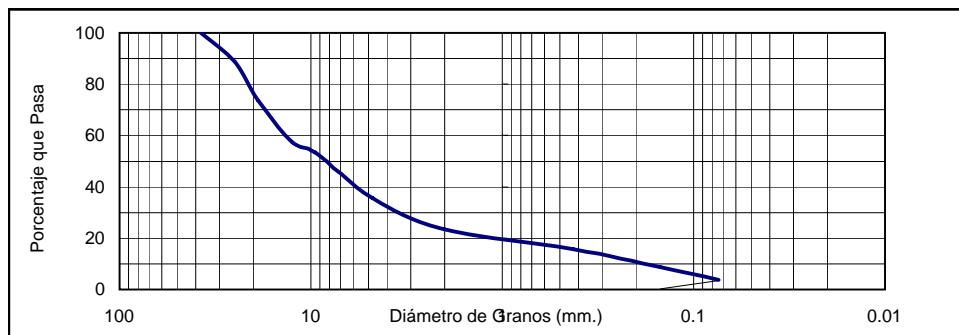
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA.
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	La Batea	MUESTRA	4	SECTOR	2
--------------	----------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	415.90
W. Tara (grs)	73.20
W. Suelo Seco (grs)	342.70
% Humedad	2.66

CLASIFICACIÓN	
SUCS	GP
Descripción:	Grava mal gradada Color marrón oscuro

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamiz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
1 1/2	37.500	0.00	100.00
1	25.000	38.80	88.68
3/4	19.000	50.80	73.85
1/2	12.500	56.50	57.37
3/8	9.500	14.00	53.28
4	4.760	60.80	35.54
10	2.000	41.40	23.46
40	0.425	26.40	15.76
100	0.149	24.50	8.61
200	0.074	16.60	3.76



Grava = 64.46%

Arena = 31.78%

Finos = 3.76%

D10	0.2027
D30	3.4942
D60	13.5373

Cu	66.7995
Cc	4.4505

Muestra tomada margen izquierda
La Batea PR 2 + 500

JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

Nit. 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

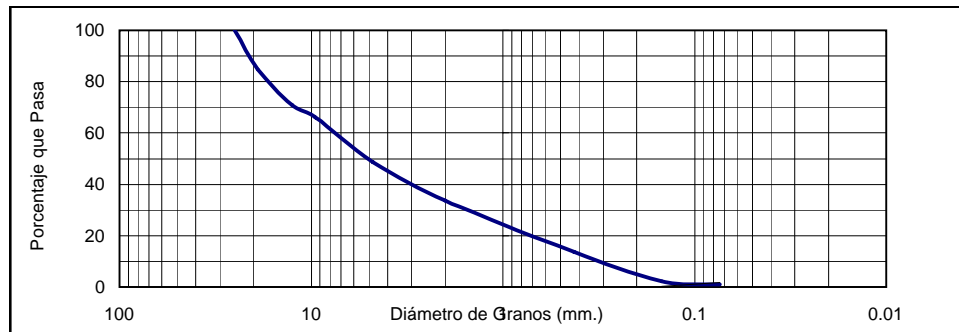
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA.
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	Puente Eliecer	MUESTRA	5	SECTOR	2
--------------	----------------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	411.90
W. Tara (grs)	72.10
W. Suelo Seco (grs)	339.80
% Humedad	3.86

CLASIFICACION	
SUCS	GW
Descripción:	Grava bien gradada. Color marrón

DISTRIBUCION DE TAMAÑO			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
1	25.000	0.00	100.00
3/4	19.000	51.70	84.79
1/2	12.500	47.20	70.89
3/8	9.500	16.00	66.19
4	4.760	60.00	48.53
10	2.000	50.70	33.61
40	0.425	67.40	13.77
100	0.149	39.20	2.24
200	0.074	4.40	0.94



Grava = 51.47%

Arena = 47.59%

Finos = 0.94%

D10	0.3348
D30	1.7134
D60	7.8386

Cu	23.4159
Cc	1.1188

Muestra tomada margen derecha puente
 Eliecer Fonseca PR 3 + 720

 JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

N.º. 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

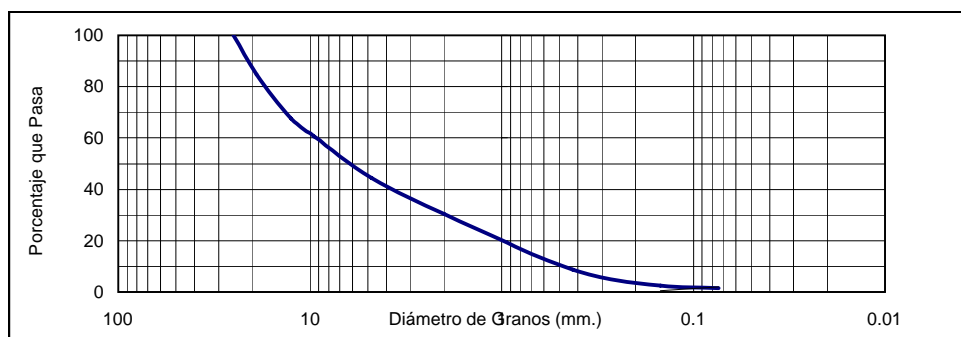
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA.
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	Pte Palenque	MUESTRA	6	SECTOR	3
--------------	--------------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	415.70
W. Tara (grs)	67.20
W. Suelo Seco (grs)	348.50
% Humedad	2.67

CLASIFICACION	
SUCS	GP
Descripción:	Grava mal gradada. Color marrón

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamíz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
1	25.000	0.00	100.00
3/4	19.000	52.70	84.88
1/2	12.500	59.90	67.69
3/8	9.500	24.30	60.72
4	4.760	57.20	44.30
10	2.000	48.30	30.44
40	0.425	75.60	8.75
100	0.149	21.80	2.50
200	0.074	3.90	1.38



Grava = 55.70%

Arena = 42.93%

Finos = 1.38%

D10	0.5158
D30	1.9680
D60	9.2922

Cu	18.0162
Cc	0.8082

Muestra tomada Pila Puente Palenque
PR 4 + 870

JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

Nit. 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

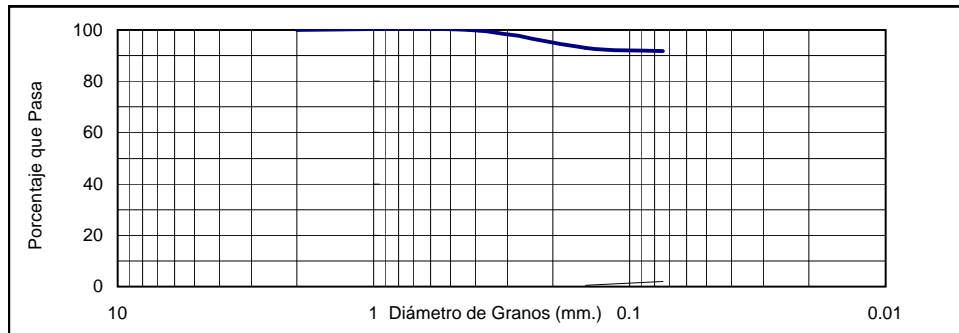
EMPRESA	GEOTECNOLOGIA LTDA
PROYECTO	RIO DE ORO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	ABRIL 01/2005

SITIO	Pte Palenque	MUESTRA	7	SECTOR	3
--------------	--------------	----------------	---	---------------	---

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	385.00
W. Tara (grs)	73.30
W. Suelo Seco (grs)	311.70
% Humedad	12.83

CLASIFICACION	
SUCS	CL
Descripción:	Arcilla poco plastica con algo de arena Color gris y amarillc

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamiz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
10	2.000	0.00	100.00
40	0.425	0.00	100.00
100	0.149	21.80	93.01
200	0.074	3.90	91.75



Grava = 0.00%

Arena = 8.25%

Finos = 91.75%

Muestra tomada margen izquierda
 Puente Palenque PR 4 + 990

 JEFE DE LABORATORIO



GEOTECNOLOGIA LTDA

N.º. 804.013.207-0

Calle 41 No. 28-33 Teléfonos: 6341255-6457507-6324888

E-mail: erosion@epm.net.co

Bucaramanga

ANEXO D

CALCULO EL PERIODO DE RETORNO

Las inundaciones ocurridas en el mes de febrero de 2005 en el Área Metropolitana de Bucaramanga, especialmente en la cabecera municipal de Girón, tienen bastante similitud con eventos ocurridos en 1931 y en 1973.

En el análisis de los tres eventos, se ha encontrado que no existe un claro registro hidrométrico de la creciente, de manera que la estimación de la frecuencia de ocurrencia o el periodo de retorno de la creciente debe ser analizada también mediante procedimientos indirectos.

En este documento se presenta el cálculo de la frecuencia de ocurrencia de crecientes como aquellas que provocaron las inundaciones de 1931, 1973 y 2005 en el Área Metropolitana de Bucaramanga, procesada por CDMB para establecer las curvas de intensidad frecuencia duración de la zona.

- **Marco teórico**

Para encontrar el periodo de retorno de eventos con caudales extremos en ausencia de registros históricos de caudales, utilizamos el concepto de distribuciones discretas, definidas como aquellas en las que la variable puede tomar un número determinado de valores, por ejemplo, una creciente con un valor máximo determinado puede ocurrir tres, cuatro o cinco, o mil veces en 100 años.

Para el caso que nos ocupa, la información analizada hasta el momento por Geotecnología Ltda., indica que las crecientes ocurridas en el Río de Oro en los años de 1931, 1973 y 2005 tienen caudales máximos aproximadamente iguales,

de manera que se puede afirmar (asumir) que el evento ha ocurrido tres veces en el periodo de 75 años.

Adicionalmente, se asume que las crecientes del río son funciones aleatorias con distribución de Gumbel o de valores extremos tipo I., cuya ecuación es:

$$Q_t = Q_{mm} + K\sigma \quad (2.37)$$

Donde:

Q_t es el caudal de periodo de retorno de T años.

Q_{mm} es el valor promedio de los caudales máximos anuales

K es el factor de frecuencia de la distribución de Gumbel

σ es la desviación estándar de la serie de los caudales máximos anuales

Los factores de k se obtienen mediante la formulación matemática planteada por Chow,

$$K = -\sqrt{6/\pi}[0.5772 + \ln(\ln(T/T-1))] \quad (2.38)$$

De la cual se obtiene los siguientes resultados:

T	K
2	-0.16
2.33	0
5	0.72
10	1.30
25	2.04
37	2.35
50	2.59
100	3.14
500	4.39

- **Aplicación a crecientes del río de Oro**

De acuerdo con Chow (1), “el periodo de retorno de un evento con una magnitud dada, puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden la magnitud especificada”; puede demostrarse que la probabilidad de ocurrencia del evento es el inverso del periodo de retorno del evento.

La aplicación de la distribución de probabilidades al evento de la creciente requiere la definición de un valor de periodo de retorno del evento; asumimos que el evento, que ocurrió tres veces en 75 años, espaciado 42 años entre 1931 y 1973, y 32 años entre 1973 y 2005, tiene un periodo de retorno promedio de 37 años; de acuerdo con lo anterior la probabilidad de ocurrencia de la creciente es de 0.027.

La inexistencia de información histórica de caudales extremos hace necesaria la búsqueda de una alternativa para analizar la frecuencia de los eventos de la creciente; el consultor ha recurrido a la información de lluvias extremas para establecer las relaciones que permitan estimar los parámetros de la distribución de probabilidad de caudales extremos.

El supuesto principal del análisis, es que la relación entre un caudal de periodo de retorno T y el caudal máximo promedio, cuyo periodo de retorno es de 2.33 años, es igual a la relación entre la intensidad de la lluvia de una hora de duración y periodo de retorno T , y la intensidad máxima promedio de la lluvia para duraciones de una hora, cuyo periodo de retorno es de 2.33 años.

La información de frecuencia de ocurrencia de lluvias extremas está compilada en la curva de intensidad - frecuencia - duración para el Área Metropolitana de Bucaramanga, establecida por la CDMB (Manual de diseño de alcantarillado, CDMB). Relación entre la intensidad I y el periodo de retorno T, para lluvias de una hora de duración.

T(Años)	I (lps/há)
2	110
2.33	121
5	155
10	185
25	220
100	241

La relación entre el periodo de retorno y la intensidad está dada por la ecuación.

$$I(\text{lps/há}) = 40.7 \ln(T) + 86.6 \quad (2.39)$$

Con base en esta información, la relación entre el evento máximo promedio (con periodo de retorno de 2.33 años) y el periodo de retorno de 37 años es de 1.93; para este estudio asumiremos un valor de dos punto cero (2.0).

Para calcular el caudal máximo promedio en Café Madrid aplicamos la relación:

$$I_{37} / I_{2.33} = Q_{37} / Q_{2.33} = 1.93 \quad (2.40)$$

Derivada de la suposición principal planteada anteriormente. Si tomamos un valor de 828 m³/s para el caudal con periodo de retorno 37 años en Café Madrid, el valor del caudal máximo promedio Q_{2.33} tiene un valor de 429 m³/s.

Utilizando la ecuación que gobierna la distribución de probabilidad de Gumbel, presentada en este documento:

$$Q_t = Q_{2.33} + K\sigma \quad (2.41)$$

Remplazando el caudal de periodo de retorno de 37 años,

$$Q_{37} = Q_{2.33} + K_{37}\sigma \quad (2.42)$$

Puede encontrarse el valor de σ , o la desviación estándar de los caudales máximos, pues Q_{37} tiene un valor de $828 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_{mm} vale $429 \text{ m}^3/\text{s}$, el factor k vale 2.35 , y despejando se obtiene σ igual a $174 \text{ m}^3/\text{s}$.