

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOCAVACION EN LA
VECINDAD DE LOS ESPOLONES EN EL RIO MAGDALENA EN EL
SECTOR PUERTO CARMELITAS – PUERTO CASABE**

**LAURA YAZMIN MARTINEZ LEAL
JULIAN ANDRES RAMÍREZ RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.000

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOCAVACION EN LA
VECINDAD DE LOS ESPOLONES EN EL RIO MAGDALENA EN EL
SECTOR PUERTO CARMELITAS – PUERTO CASABE**

**LAURA YAZMIN MARTINEZ LEAL
JULIAN ANDRES RAMÍREZ RODRIGUEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
JAIME SUAREZ DIAZ
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 ESPOLONES	3
1.1 ASPECTOS GENERALES	3
1.2 VENTAJAS DE LOS ESPOLONES	4
1.3 DESVENTAJAS DE LOS ESPOLONES	5
1.4 ELEMENTOS DE UN ESPOLON	5
1.4.1 La punta o cabeza del espolón	6
1.4.2 La cresta o corona	6
1.4.3 Anclaje o raíz	7
1.4.4 Cimentación	7
1.5 CLASIFICACION DE LOS ESPOLONES	8
1.5.1 Forma de los espolones	8
1.5.2 Permeabilidad del espolón	9
2 DISEÑO	10
2.1 CRITERIOS DE DISEÑO	10
2.2 RECOMENDACIONES EN EL DISEÑO DE ESPOLONES	11
2.3 DISEÑO DE ESPOLONES	12
2.3.1 Localización en planta	14
2.3.2 Longitud de los espolones	15
2.3.3 Separación entre espolones	16
2.3.3 .1 Separación en tramos rectos	18
2.3.3 .2 Separación en curvas	18
2.3.4 Elevación y pendiente de la corona	19

2.3.5	Pendientes laterales de los espolones	21
2.3.6	Angulo de orientación res a la orilla	21
2.3.6 .1	Espolones inclinados hacia aguas arriba (ángulo $\alpha > 90^\circ$)	21
2.3.6 .2	Espolones inclinados hacia aguas abajo (ángulo $\alpha < 90^\circ$)	22
2.3.6 .3	Espolones ortogonales al flujo (ángulo $\alpha = 90^\circ$)	22
2.3.7	Materiales de construcción	23
2.4	EFFECTO DE LOS ESPOLONES	25
2.4.1	Patrones de flujo en ríos con espolones	25
2.4.2	Sistemas de circulación	26
2.4.3	Efectos de los espolones en las corrientes secundarias	28
2.4.4	Efectos morfológicos de los espolones en un río	30
3	SOCAVACION	31
3.1	ASPECTOS GENERALES	31
3.1.1	Socavación estable	32
3.1.2	Socavación de agua clara	32
3.1.3	Socavación de lecho vivo	32
3.2	TIPOS DE SOCAVACION	34
3.3	SOCAVACION POR CONTRACCIÓN DEL CAUCE	36
3.4	SOCAVACION EN LOS ESPOLONES	37
3.5	CALCULO DE LA SOCAVACION EN ESPOLONES	38
3.5.1	Profundidad de socavación local para una serie de espolones	45
4	CARACTERISITICAS DEL RIO MAGDALENA	47
4.1	EL MEDIO NATURAL	47
4.1.1	Aspectos Climáticos	47
4.2	MORFOLOGIA Y DINAMICA FLUVIAL	49
4.3	PROBLEMAS GENERALES DEL RIO	51
4.4	RESISTENCIA DE ORILLAS	52
4.5	CONTROLES GEOLÓGICOS	55

4.5.1	Sector Peñas Blancas-Punta Carmelitas	55
4.5.2	Islas y Caños junto a la desembocadura del Río Opón	56
4.5.3	Meseta de Barrancabermeja, sector Hotel Pipatón	57
4.5.4	Estrechamiento de Galán	57
4.6	CONTROLES ARTIFICIALES	58
4.7	MATERIAL DEL LECHO	59
4.7.1	Granulometría	59
4.7.2	Peso unitario	63
4.7.3	Factor de rugosidad	63
4.8	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	65
4.9	SEDIMENTACIÓN	65
4.10	ESTUDIO HIDROLOGICO	67
4.11	Estudio hidráulico.	69
5	INFORMACIÓN DETALLADA DE LAS OBRAS REALIZADAS	73
5.1	DISEÑO	75
5.2	METODO CONSTRUCTIVO	79
6	RELACION DE PLANOS	81
7	ANALISIS	85
7.1	ANALISIS DE LAS ECUACIONES	85
7.2	ANALISIS POR PLANOS	93
7.2.1	Planos del tramo curvo	93
7.2.1 .1	Análisis plano 3	93
7.2.1 .2	Análisis plano 5	95
7.2.1 .3	Análisis plano 6	97
7.2.2	Planos del tramo recto	100
7.2.2 .1	Análisis plano 4	100
7.2.2 .2	Análisis plano 2	103
7.2.2 .3	Análisis plano 9	105

7.3	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS PLANOS	107
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
	BIBLIOGRAFIA	122
	ANEXOS	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elementos de un espolón	6
Figura 2. Formas comunes de los espolones.	8
Figura 3. Localización en planta	17
Figura 4. Espaciamiento entre espolones.	18
Figura 5. Flujo patrón en los espolones	25
Figura 6. Variación de los patrones de flujo al aumentar el espaciamiento.	28
Figura 7. Variación de la profundidad de socavación con el aumento de la velocidad media	33
Figura 8. Profundidad de socavación versus tiempo.	33
Figura 9. Valores de factores dependientes del coeficiente del grano arrastrado.	43
Figura 10. Efecto de la relación de contracción en la profundidad relativa socavada (el número de línea es referido en las tablas 3 y 4)	43
Figura 11. Efecto del ángulo de inclinación del espolón en profundidad de socavación alrededor de su punta (los números de las líneas son referidos en la tabal 3 y 4)	44
Figura 12. Efecto de pendiente del talud en la profundidad relativa (los números de líneas son referidos en las tablas 3 y 4)	44
Figura 13. Curvas granulométricas del sector de Barrancabermeja.	62
Figura 14. Espolones puerto Pinto-puerto Casabe.	73
Figura 15. Plano General de ubicación.	74
Figura 16. Hexápodo tipo Casabe	79

Figura 17. Plano 3	94
Figura 18. Plano 5	96
Figura 19. Plano 5	98
Figura 20. Plano 4	101
Figura 21. Plano 2	104
Figura 22. Plano 9.	106
Figura 22. Comparación de perfiles.	108
Figura 23. Representación de una fosa de socavación.	109
Figura 24. Superposición de fosas.	110
Figura 25. Profundización producida por la acción del thalweg.	110
Figura 26. Fosas cercanas por acción de un grupo de espolones.	111
Figura 27. Canal producido por el thalweg entre fosas de un grupo de espolones.	111
Figura 28. Ejemplo de curvas batimétricas del plano 6.	112
Figura 29. Canal producido después de la socavación en el tramo curvo.	113
Figura 30. Socavación rodeando la punta de los espolones.	114
Figura 31. Ejemplo espolones para un canal navegable.	115
Figura 32. Representación de superposición de fosas para canal navegable.	116

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Separación de espolones en tramos rectos.	18
Tabla 2. Separación de espolones en tramos curvos	18
Tabla 3. Ecuaciones para el cálculo de la profundidad relativa de la cavidad de socavación $H'=(h+z)/h$; donde h es el nivel de aguas medidos a partir del nivel del lecho sin socavar y z es la profundidad socavada.	39
Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de la máxima profundidad de la cavidad de socavación $H =z/h$.	41
Tabla 5. Valores de los coeficientes k' de acuerdo a Ahmad (1953)	45
Tabla 6. Controles artificiales del río	58
Tabla 7. Granulometría obtenida del L.E.H.U.N	60
Tabla 8. Granulometría obtenida L.E.H.U.N	61
Tabla 9. Granulometría media	62
Tabla 10. Pesos Unitarios	63
Tabla 11. Carga de sedimentos	65
Tabla 12. Erosión y sedimentación	67
Tabla 13. Precipitaciones mensuales	68
Tabla 14. Estaciones para análisis de lluvias	69
Tabla 15. Caudales medidos del río	70
Tabla 17. Niveles del río Magdalena	71
Tabla 18. Estación Galán, código 315705, km 628,70.	72
Tabla 19. Sector: aguas arriba de Punta Carmelitas	75
Tabla 20. Sector: Bahía Carmelitas	76

Tabla 21. Aguas debajo de Puerto pinto	77
Tabla 22. Aguas arriba de Puerto Pinto	77
Tabla 23. Relación de planos	81
Tabla 24. Ecuaciones sometidas a análisis	86
Tabla 25. Niveles de socavación según el transporte de sedimentos.	92
Tabla 26. Comparación de cuencos de socavación.	107

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Hoja de Compromiso	12
Anexo B. Carta de Compromiso de Financiación	13
Anexo C. Marco Teórico	14
Anexo D. Glosario de Términos	19

RESUMEN

TITULO: **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOCAVACION EN LA VECINDAD DE LOS ESPOLONES EN EL RIO MAGDALENA EN EL SECTOR PUERTO CARMELITAS – PUERTO CASABE.***

AUTOR: **LAURA YAZMIN MARTINEZ LEAL
JULIAN ANDRES RAMIREZ RODRIGUEZ**

PALABRAS CLAVES: **Espolón, Hexapodos, Río Magdalena, Socavación, Sedimentación, Puerto Casabe, Puerto Pinto, Puerto Carmelitas**

CONTENIDO:

El objetivo de este escrito es presentar un documento que recopile el trabajo realizado en el proyecto. El proyecto contiene un marco teórico del concepto de los espolones y de la socavación; además un breve resumen de las características generales del río Magdalena a través de la historia.

El proyecto se basa en la gran información existente gracias a estudios realizados para efectuar diversas obras en la zona, buscando estudiar el efecto de los espolones, específicamente con la socavación que ellos han producido, para comparar si realmente sucede como se ha analizado en varias partes del mundo donde han estudiado otros ríos y modelos hidráulicos; y así finalmente poder determinar si realmente estas teorías se acercan a la realidad o simplemente funcionan muy bien bajo condiciones tan especiales y únicas como las del sitio que fueron origen. Es decir, si los efectos de la socavación de estas obras no se han logrado generalizar en una sola teoría de diseño que sea efectiva en cualquier río del mundo y simplemente es un caso que hasta ahora toca tratar según el clima, la vegetación, terreno, la hidrología, etc. de cada región, y así tener algunas conclusiones que puedan llegar a ser las bases necesarias para crear una teoría de diseño adecuada a las condiciones del río Magdalena; para evaluar su efectividad y determinar así si su aplicabilidad es viable en diseños futuros para este sector específico

Se realizó además la determinación de las características de los cuencos de socavación que se repiten en los diversos planos batimétricos suministrados por la empresa GEOTECNOLOGIA LTDA como áreas, volúmenes y forma de los cuencos.

* Proyecto de Investigación
Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería Civil.
Ing. Jaime Suárez Díaz

SUMMARY

TITLE: PRACTICES MANAGERIAL PRACTICES CELEBRATED AMONG THE COMPANY PRIVATE COLOMBIAN OF EXTRUSION CORP. (EXTRUCOL CORP.) AND THE SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING (INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER), WHICH CONSISTS ON THE DEVELOPMENT OF STUDIES OF INTEREST FOR THE TECHNICAL AREA. *

AUTHOR: JOSÉ ANDRÉS FERNÁNDEZ VARGAS * *

KEY WORDS: PIPE, SEWER SYSTEM, RIGIDITY, LOADS, DEFLECTION, INDEX OF WATER NOT COUNTED.

CONTENT:

The objective of this writing is to present a document that gathers the information of the three topics proposed by the Company EXTRUCOL CORP. to the author.

The first one consists on the detection of advantages and disadvantages of fifteen different pipes used in the construction of Sewer systems in the country, the used methodology was the elaboration of charts where you orders for topics the different characteristics of interest, summarized of the different commercial catalogs and you paginate Web.

In second place it is the realization of a study of rigidities in four types of flexible pipes, using the rehearsal methods proposed by the norms NTC 3254 (Determination of the characteristics of external load of plastic tubes by means of parallel badges) and NTC 4215 (Tubes thermoplastics. Determination of the ring rigidity), for the gathering of data they were carried out the two rehearsals in the laboratory of the company EXTRUCOL CORP.

For I finish one carries out a study of factors that you/they not intervene in the increase of the index of water not counted in aqueducts, making emphasis in those where it influences the pipe directly, some processes are also shown that have suffered companies sellers of the service of drinking water in the reduction of the not counted water (you Work and achievements) and for I finish the structure it is exposed it would tariff current and the previously noted influence of the lost ones in the same one. For this different bibliographical sources were studied and you paginate Web, it is necessary to stand out that this I modulate it was revised by the Engineer Enrique Forero, person that manages the topic.

* Inform of Managerial Practice.

* * Physical-mechanical Sciences Faculty, Civil engineering School.
Eng. Mario García Solano.

INTRODUCCIÓN

En una corriente o río se presentan dos tipos básicos de erosión: Profundización del cauce y erosión lateral. El equilibrio del cauce esta controlado por el balance entre la carga de sedimentos depositada y la capacidad de transporte de flujo. En todos los casos, aun en las corrientes mas estables se presentan fenómenos de erosión y se puede requerir la construcción de obras de control lateral como de fondo.

La erosión en las orillas de un río puede ocasionar mas daños que la erosión de fondo, ya que puede lograr correr tanto la margen de un río, a tal punto que su corriente alcance infraestructuras cercanas como puertos, campos petroleros, poblaciones, etc. Por la necesidad de controlar esta amenaza es que han surgido obras como los diques marginales y los espolones.

Los espolones son elementos laterales que tratan de proteger la orilla y al mismo tiempo desviar la corriente. Su método constructivo es sencillo y tiene la ventaja sobre los diques marginales de ser más económicos por que requieren menores longitudes. Estas obras son la mejor alternativa para casos como el presentado en la margen izquierda del Río Magdalena donde fueron utilizados como medida de emergencia, para proteger el dique marginal Casabe.

Como toda obra localizada dentro de un cauce, los espolones del Río Magdalena han sufrido las consecuencias de la socavación, llegando incluso al hundimiento parcial o total de su estructura; lo que ha requerido un continuo mantenimiento para garantizar su funcionamiento, debido a su importancia.

Este proyecto pretende encontrar patrones en el comportamiento de la socavación, basándose en el estudio de planos batimétricos existentes en la vecindad de los espolones construidos en el Río Magdalena sector puerto Carmelitas- Puerto pinto y Puerto pinto-Puerto Casabe. Y lograr así aportar criterios que sirvan de guía para futuros estudios que pretendan replantear la metodología para el diseño de la cimentación de estas obras.

1 ESPOLONES

1.1 ASPECTOS GENERALES

Un espolón fluvial es una estructura realizada que parte de la margen o de un dique longitudinal, avanzando hacia el centro del río. Parte de la obra está en tierra y sirve para anclarlo al terreno, mientras que el resto está dentro de la corriente.

Los espolones son usados principalmente para:

- Protección de márgenes.
- Control del curso del canal de máxima profundidad (thalweg).

El trabajo de los espolones es alejar de la orilla en que se apoyan, las líneas de corriente que amenazan con erosionarla, incrementando la velocidad del agua al disminuir la sección del río, aumentando el gradiente y generando macroturbulencia intensa. La turbulencia generada por la cabeza o punta de los espolones puede producir remolinos o vórtices fuertes que generan a su vez socavación, la cual representa un problema de estabilidad para la estructura del espolón y además puede desviar el thalweg desfavorablemente. Para disminuir este efecto se pueden tener diques muy largos en su punta junto al agua para ayudar a definir el canal y crear así zonas de calma relativa entre espolón y espolón, las cuales se llenan paulatinamente con materiales arrastrados, hasta que se forma otra nueva orilla estable.

Los controles que ejercen los espolones no deben ocasionar súbitos cambios en la dirección del flujo, sino extenderla gradualmente, lo más suavemente posible, para conducirla con la dirección del flujo. Estos controles podrían iniciarse aguas arriba del punto al que se quiere cambiar la dirección de la

corriente donde ella comienza a asumir el proceso que se quiere corregir y no donde el proceso es vicioso y manifiesto, aunque sólo sea un punto donde se origine el daño por eliminar. En general la intervención es requerida en la curva cóncava y en el rectificado, raramente en la curva convexa. Los espolones se utilizan además, en ríos meándricos para controlar el flujo en la entrada o salida de la curva.

Al decidirse por construir entre los espolones y los revestimientos longitudinales como estructuras más comunes usadas para controlar el cauce de un río, se debe tener en cuenta que los espolones tienen una ventaja muy importante, ya que son más económicos por que son considerablemente mas cortos; sin embargo hay que tener en cuenta que hay sitios donde los espolones no pueden ser utilizados y se impone el recurso de la obra longitudinal, por lo regular son aquellos lugares donde no se puede disminuir el área hidráulica del río o curvas con un radio muy reducido o en tramos de río con pendiente mayor del 2% debido a que las corrientes con estas pendientes son tan fuertes que es prácticamente imposible garantizar la estabilidad de los espolones.

1.2 VENTAJAS DE LOS ESPOLONES

- ◆ La ubicación y sedimentación entre espolones permite la fijación definitiva de las orillas.
- ◆ Su estructura no permite desplazamientos.
- ◆ Los costos de construcción son más bajos que otras alternativas de protección de márgenes.

- ◆ La obra en conjunto continúa trabajando aun que uno o dos de los espolones hayan sido socavados en sus extremos o destruidos y separados de la margen.
- ◆ Se reducen los costos por mantenimiento ya que permite la construcción o reparación de espolones sin incidir en la función de los aledaños.

1.3 DESVENTAJAS DE LOS ESPOLONES

- ◆ Disminuyen el área hidráulica
- ◆ Aumentan la rugosidad de las orillas
- ◆ No se pueden usar en curvas con radios muy reducidos
- ◆ Se requieren como mínimo la construcción de tres espolones

1.4 ELEMENTOS DE UN ESPOLON

Un espigón consta de los siguientes elementos:

La punta o cabeza del espolón.

La cresta o corona.

Anclaje o raíz.

Cimentación.

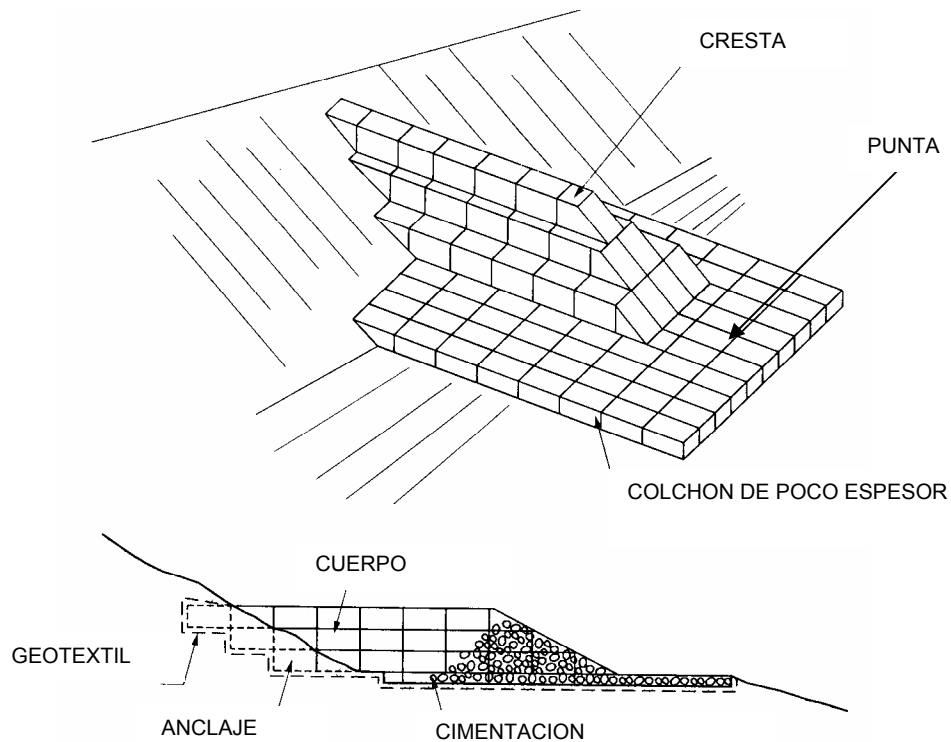


Figura 1. Elementos de un espolón

1.4.1 La punta o cabeza del espolón

Constituye el punto crítico para su socavación por ser el elemento mas expuesto al choque con el flujo debido a la desviación que esta debe producir; por eso allí hay alta concentración de corrientes y gran velocidad del agua.

1.4.2 La cresta o corona

La forma de la cresta puede variar siendo horizontal o ascender hacia la orilla además puede ser sumergida o levantada con respecto al nivel del agua de diseño. Las obras sumergibles ofrecen menor obstáculo y provocan socavaciones en el fondo menos peligrosas, favoreciendo la extensión de las

aguas extraordinarias y así, el depósito entre las obras. Pero se deben proporcionar un sistema de protección contra la socavación en el lado aguas abajo.

La inclinación de la corona hacia el río, tiene la finalidad de salvaguardar al espigón de la socavación aguas arriba y de asegurar el relleno de las orillas. Es una buena regla que la cabeza no supere o supere muy poco, el nivel del caudal ordinario, la cabeza horizontal se presenta particularmente eficaz para inducir las aguas a profundizar la socavación donde se desea obtener un canal de sequía profundo.

1.4.3 Anclaje o raíz

La raíz debe proporcionar una longitud de empotramiento que debe permanecer insumergible, variable en función de las condiciones del terreno, que iniciándose en la margen se prolonga hasta la línea a donde se considere deba cesar la expansión del agua en la fase de avenidas máximas; luego una barra sumergible, que partiendo de la cota de aguas máximas, se inclina hacia adentro del río hasta sumergirse con la cabeza, algo más abajo del caudal de los alcances ordinarios, protegidos por amplias plateas, terminal y lateral.

1.4.4 Cimentación

Es el factor que determina la durabilidad del espigón. El cimiento a su vez esta constituido por la fundación propiamente dicha y de un tapete o colchón como protección contra la socavación.

1.5 CLASIFICACION DE LOS ESPOLONES

1.5.1 Forma de los espolones

Los espolones pueden también clasificarse de acuerdo a su forma en planta:

Espolón recto: Formando un ángulo recto con la orilla y que tiene una cabeza con un sistema de protección contra la socavación en la punta.

Espolón en forma de T: El ángulo es generalmente de 90 grados y el dique en la punta es paralelo a la dirección del flujo.

Espolón en forma de L: La cabeza en L impide que la corriente se acerque a la orilla permitiendo así mayor espacio para sedimentación entre espolones y creándose también detrás de las eles el hábitat propicio para diversas comunidades acuáticas. Además la ele induce socavación profunda a lo largo de su cara, paralela al flujo pero siendo todavía esta menor que en los diques con punta.

Espolones en forma de jockey: Que poseen huecos los cuales son más extensivos en área que los en forma de T.

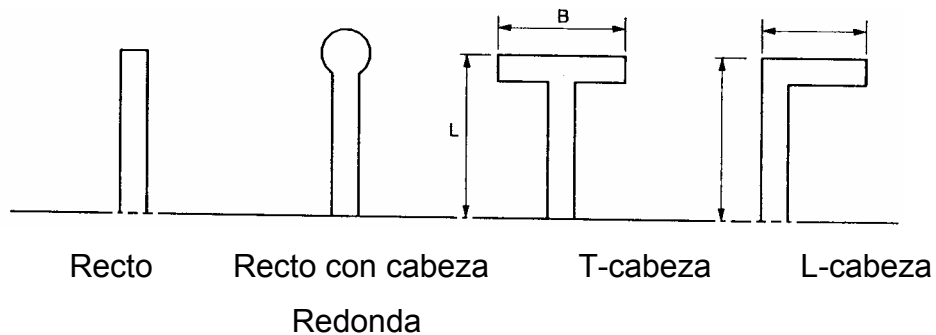


Figura 2. Formas comunes de los espolones.

1.5.2 Permeabilidad del espolón

Los espolones son clasificados según el método y materiales de construcción, es decir permeable o impermeable. Los términos permeable e impermeable son autoexplicativos y se diferencia por la habilidad del material de la construcción de transmitir el flujo. Los espolones permeables reducen hacia abajo la velocidad de la corriente mientras los espolones impermeables desvían la corriente. Se fabrican más a menudo los espolones permeables de pilotes, bambú o maderas mientras se usan piedra, arena gruesa o gaviones para construir espolones impermeables. Los espolones permeables son muy eficaces en los arroyos aluviales con carga de lecho considerable y concentración alta de sedimento lo cual favorece la deposición rápida alrededor del espolón. Esta sedimentación se logra obstruyendo el flujo y reduciendo las velocidades. Sin embargo, ellos también pueden usarse en arroyos relativamente claros donde la caída de la fuerza erosiva de la corriente es suficiente para prevenir la erosión local de orilla. El espolón impermeable o sólido es usado primordialmente para proteger secciones de orillas de la erosión y empujar el río hacia una alineación más conveniente. Favoreciendo así, la sedimentación entre espolones. Como la socavación en las cabezas de espolones impermeables son inducidas rápidamente por flujos cambiantes, estos son especialmente útiles para mantener las profundidades navegables en los arroyos. Usualmente, los espolones de tipo permeables pueden ser mas separados que los de tipo impermeable.

2 DISEÑO

2.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Al querer desviar la corriente por un alineamiento deseado, que es lo que se consigue con la construcción de los espolones se recomienda seguir los siguientes criterios de canalización:

1) Considerar el nuevo comportamiento que tendrá el flujo, para así poder determinar si se requieren mas obras que garanticen el curso estable del río con una mínima erosión de orilla. Y si se requieren, se debe realizar oportunamente su diseño y construcción.

2) La canalización a diseñar debe basarse no solo en condiciones de flujo normal sino para las condiciones de avenidas máximas con un periodo de retorno de 200 años que también debe estar en capacidad de soportar.

3) Para minimizar los efectos nocivos al medio ambiente, se deben considerar el mínimo de obras artificiales ya que los cambios van a ser irreparables, e incluir al máximo obras con vegetación.

4) Las obras de canalización deben garantizar el transporte eficiente de carga suspendida y de lecho.

Es ideal que los diseños de los espolones cumplan estos parámetros de canalización, pero también garantizar que no sufran fallas, destrucción y/o arrastre por avalanchas y otras amenazas, para esto se recomienda hacer un estudio previo de los siguientes aspectos:

- a) Conocimiento del régimen hidráulico del río.
- b) Calculo de socavación del cauce con el espolón.
- c) Diseño estructural (resistencia y flexibilidad. Un espolón de alta flexibilidad va adaptándose al terreno a medida que se produce la socavación. La obra cede en la parte erosionada, se flexiona y adopta la nueva forma del terreno. Puede ocurrir, sin embargo que la flexibilidad del espolón no sea lo suficientemente alta y tienda a romperse por flexión para ser arrastrada por el río, o que la fuerza de la creciente sea tal que arrastre totalmente el espolón.
- d) Diseño hidráulico, considerando las siguientes variables:
 - Pendiente y velocidad del río.
 - Características del material de fondo (arcilla, limos, arena, grava, cantos, guijarros.
 - Tamaño del canal (ancho y sección.
- e) Diseño de su cimentación profundizando los espolones tanto como sea posible dentro del fondo del río para evitar su destrucción o barrida.

2.2 RECOMENDACIONES EN EL DISEÑO DE ESPOLONES

1. Antes de decidir sobre la aplicabilidad de los espolones a un caso particular, es necesario evaluar objetivamente las causas de la erosión de orillas.

2. Si el fenómeno es predominantemente falla geotécnica, no se deben usar espolones sino protecciones longitudinales, con énfasis en la solución del problema de drenaje de la orilla y en el aislamiento de los suelos no cohesivos de la acción del agua.
3. Si el fenómeno es predominantemente hidráulico, se debe evaluar objetivamente la efectividad de las estructuras para reducir el proceso, de acuerdo con la composición de los suelos, el “esfuerzo crítico de corte” y la habilidad del campo de espolones para reducir la velocidad del agua y producir depósitos.
4. Es necesario evaluar si los espolones pueden o no producir depósitos de sedimento. Si esto no es así, el sistema es poco recomendable.
5. Si es factible obtener depósitos, el diseño debe estar encaminado a optimizar la localización de los espolones para lograrlo.
6. En general no se deben emplazar espolones sobre la margen externa de las curvas, puesto que es la localización donde típicamente son inválidas la mayoría de las hipótesis sobre las cuales se fundamenta la efectividad de éstas estructuras.

2.3 DISEÑO DE ESPOLONES

No existen criterios objetivos para el diseño de los espolones; sin embargo se debe hacer énfasis en las siguientes premisas:

- Que la erosión de las orillas es el resultado directo de la acción de la velocidad de la corriente.

- Que la erosión de orillas se reduce substancialmente al reducir la velocidad de la corriente en sus inmediaciones.
- Que cualquier grado de reducción de la velocidad de corriente, es suficiente para estabilizar la orilla.
- Que los espolones son efectivamente capaces de reducir la velocidad de la corriente en las inmediaciones de la orilla.
- Que el esfuerzo de corte generado por la corriente sobre la orilla, se ejerce a lo largo de líneas que corresponden con las trayectorias que definen la dirección principal del flujo.
- Que las trayectorias del flujo pueden ser efectivamente deflectadas por los espolones.
- Que existen sedimentos depositables en la zona del canal donde se han de emplazar los espolones.
- Que el campo de espolones es capaz de generar depósitos de sedimentos en sus vecindades.
- Que la depositación de sedimentos puede impedir la subsecuente erosión de la orilla.
- Que la longitud total de los espolones a construir es substancialmente inferior a la longitud de la orilla a proteger, (pues de lo contrario los costos no podrían ser inferiores a los de un revestimiento longitudinal).

Los puntos más importantes a tener en cuenta en el diseño de una protección de la margen de un río a base de espolones son:

- Localización en planta. Radios de las curvas, longitud de las tangentes, ancho estable del río.
- Longitud de los espolones
- Separación de los espolones
- Elevación y Pendiente de la corona

- Pendientes laterales de los espolones
- Angulo de orientación respecto a la orilla
- Material de construcción.
- Determinación de las condiciones de flujo en la región a proteger
- Socavación en la curva y socavación local en el extremo del espolón

2.3.1 Localización en planta

Los centros de gravedad de las distintas secciones mojadas del cauce de un río definen una línea curva sensiblemente regular o continua a lo largo del mismo, que proyectada sobre la superficie en planta viene a dar aproximadamente el eje o dirección media que sigue la masa de agua. Regularizando en todo lo posible esta línea, es decir, procurando suavizar cualquier punto de discontinuidad, obtendremos una curva que, en definitiva, la podremos adoptar como la dirección ideal de la corriente respecto al límite exterior de cualquier sistema normal de encauzamiento que hubiera de proyectarse.

Un sistema de defensa debe cooperar con la regulación y encauzamiento de la corriente, por tanto, una paralela a dicha dirección nos fijará la alineación externa hasta donde deben llegar los espolones de defensa y recuperación; entendiendo que esta línea no podrá rebasar de un límite a partir del cual el caudal del río pueda quedar estrangulado, y tienda a compensar la falta de sección a costa de la superficie reservada al desagüe contrario, con la consiguiente afección a la margen correspondiente. La longitud de cada espolón está dada por la distancia de la orilla real a esa línea. Cuando se trata de una rectificación en cauces formados por arenas y limos conviene, dentro de lo posible, que los radios de las curvas, medidos hasta el eje del río, tengan la longitud (R) comprendida entre 2.5 y 8 veces (B) el ancho de la superficie del agua o la separación entre las nuevas orillas.

Al respetar los radios anteriores, la defensa que se haga en base a espolones trabajará eficientemente, si los radios de curvatura son menores, la separación de los espolones disminuye y económicamente es preferible construir una defensa marginal apoyada en la orilla. Si los radios son mayores, el río tiende a formar un cauce con menores radios dentro de la curva y no todos los espolones trabajarán eficientemente.

La curva que une a los extremos de los espolones deberá trazarse lo más uniformemente posible, aunque no necesariamente tendrá un radio único. Por último conviene aclarar que aunque la línea teórica que une los extremos de los espolones pueda tener diversos radios de curvatura, nunca deberá tener un tramo en que su radio de curvatura se mida hacia la orilla exterior. Todos los radios de esa línea se deberán medir hacia el mismo lado; es decir, hacia el interior de la curva.

2.3.2 Longitud de los espolones

La longitud total de un espolón se divide en:

Le: longitud de anclaje o empotramiento, dentro de la margen, deberá ser lo suficientemente larga para evitar el peligro de flanqueo de la obra. La máxima longitud de anclaje es $Lt/4$.

Lt: longitud de trabajo, dentro del cauce, medida sobre la corona conviene que esté dentro de $h < Lt < B/4$.

Donde:

h: tirante para el caudal de diseño.

B: ancho medio del cauce

La longitud de anclaje deberá ser suficiente para garantizar que la corriente no pueda desviarse por detrás de los espolones, siendo entonces mayor cuando la orilla tenga poca altura.

Al protegerse, ya sea una sola curva, o un tramo completo, los primeros tres espolones de agua arriba deben tener longitud variable. El primero deberá ser de la menor longitud posible (igual al tirante), y los otros aumentan uniformemente, de tal manera que el cuarto tenga ya la longitud de proyecto. La pendiente longitudinal de la corona debe ser uniforme en todos ellos y por lo tanto la misma de los demás espolones.

En resumen, las obras consisten en una longitud de empotramiento, variable en función de las condiciones del terreno, seguida de una raíz insumergible, que iniciándose en la margen se prolonga hasta la línea a donde se considere deba cesar la expansión del agua en la fase de avenidas máximas; luego una barra sumergible, que partiendo de la cota de aguas máximas, se inclina hacia adentro del río hasta sumergirse con la cabeza, algo más abajo del caudal de los alcances ordinarios, protegidos por amplias plateas, terminal y lateral.

2.3.3 Separación entre espolones

La separación entre espolones corresponde a la distancia que hay entre el anclaje de un espolón hasta el anclaje del siguiente. Con la longitud del espolón de aguas arriba, su orientación y la localización de la orilla; junto con la desviación teórica de la corriente al pasar por el extremo del espigón (que es aproximadamente de 9 a 14) se determina hasta que punto entraría de nuevo la corriente a erosionar la orilla aguas abajo, así se ubica el siguiente

espolón de manera que la corriente desviada lo encuentre en un punto cercano a la margen, sin que llegue a erosionarla y comprometa la seguridad del empotramiento de dicha obra.

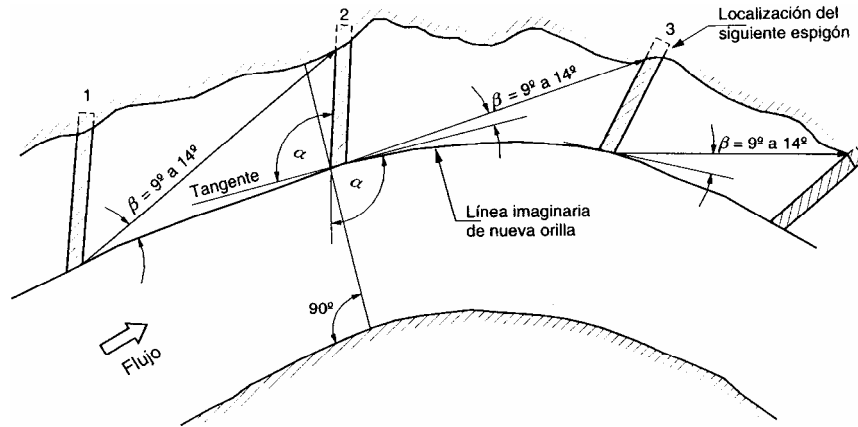


Figura 3. Localización en planta

Una de las decisiones más importante del diseño es la separación entre espolones individuales. Los espolones deben colocarse a una distancia tal que la acción conjunta de ellos pueda separar el eje de flujo de la orilla, se debiliten las corrientes entre espolones y se promueva entonces, sedimentación en los espacios entre ellos (Przedwojski 1995. Si los espolones están demasiado separados, las corrientes pueden atacar la orilla que se pretende proteger entre ellos. La construcción de espolones muy cerca unos de los otros produce un sistema menos eficiente y más costoso.

El espaciamiento del espigón requerido para protección de orilla es menos que el solicitado para los cauces de la navegación, ya que el propósito primario es mover la corriente erosionable fuera del banco y no necesariamente para crear un cauce profundo bien definido.

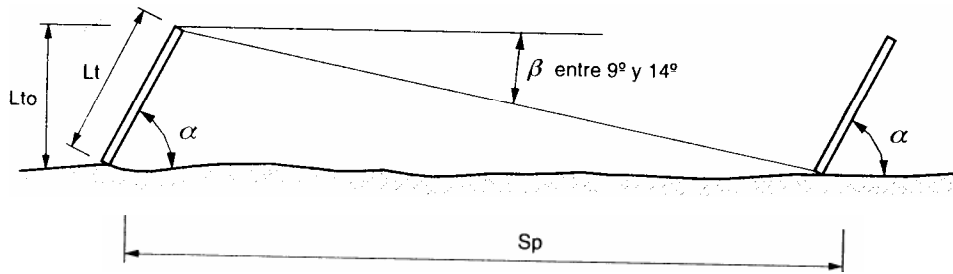


Figura 4. Espaciamiento entre espolones.

2.3.3.1 Separación en tramos rectos

Las recomendaciones de Maza Álvarez (1989)son las siguientes:

Tabla 1. Separación de espolones en tramos rectos.

Ángulo de Orientación	Separación Sp
90° a 70°	(5.1 a 6.3) Lt, (5.2 a 6.4) Lto
60°	(5 a 6) Lt, (5.7 a 6.9) Lto

Cuando se requieran construir espolones en tramos rectos y sin empotramiento en la margen, la separación deberá ser la que se indica en la tabla 1.

2.3.3.2 Separación en curvas

Las recomendaciones de Maza Álvarez (1989)son las siguientes:

Tabla 2. Separación de espolones en tramos curvos

α	Lt	Sep teórico en función Lto	Sp teórico en función Lt	Sp recomendable	
				Empotrado	No empotrado
60	1.15Lto	5.7-6.9	5.0-6.0	6Lt	5Lt
70	1.06 Lto	5.4 - 6.6	5.1 - 6.3	6.3 Lt	5Lt
90	Lto	5.1 -6.3	5.1 -6.3	6.3Lt	5Lt

Para la localización de espolones en curva Maza (1989) recomienda suponer un ángulo β de 9° a 14° de desviación de la corriente para la colocación del siguiente espolón. Si la curva es regular y tiene un único radio de curvatura la separación que se ha probado con buenos resultados es $Sp = (2.5 \text{ a } 4) Lt$; para radios de curvatura mayores de cuatro B se han usado separaciones de $4 Lt$. Si la curva es irregular o con un radio de curvatura pequeña la separación de espolones necesariamente debe encontrarse en forma gráfica.

Los ínterspacios de espolones muy largos se rellenan con dificultad, por lo cual, se recomienda construir una primera etapa de espolones cortos que luego se prolongarán cuando el relleno conseguido se considere suficiente por lo que es posible en un proyecto general de regulación, construir en una primera etapa aquellas obras idóneas para provocar la modificación más importante, para después proceder gradualmente a la realización de las obras necesarias para crear el arreglo definitivo.

2.3.4 Elevación y pendiente de la corona

La sumergibilidad de la corona es una característica muy importante con pocas excepciones. Las obras sumergibles ofrecen menor obstáculo y provocan socavaciones en el fondo menos peligrosas, favoreciendo la extensión de las aguas extraordinarias y así, el depósito entre las obras.

La raíz también deberá siempre resultar insumergible, aún en ocasiones de máxima avenida, evitando el flanqueo siempre peligroso, no tanto por la conservación de la obra, sino por el daño que pueda acarrear a la margen y al régimen del curso del agua, pudiéndose provocar un completo cambio en el cauce del río.

Los espolones deben construirse con pendiente hacia adentro del río. Deben inclinarse a la elevación de la margen o a la elevación de la superficie libre correspondiente al caudal dominante, si esta cota es mayor que la cota de la orilla del espigón debe construirse con la corona al mismo nivel de la orilla, ya que esta tiene la finalidad de salvaguardar al espolón de la socavación aguas arriba y de asegurar el relleno de las orillas.

Es una buena regla que la cabeza no supere o supere muy poco, el nivel del caudal ordinario, la cabeza horizontal se presenta particularmente eficaz para inducir las aguas a profundizar las socavaciones donde se desea obtener un canal de sequía profundo. El extremo dentro del cauce debe tener alturas máximas de cincuenta centímetros sobre el fondo actual; con ellos se logran pendientes de 0.5 a 0.25. Los espolones construidos con pendientes longitudinales de 0.1 o mayores han proporcionado más favorablemente el depósito de sedimento entre ellos y han resultado más económicos. Las últimas experiencias obtenidas indican que se disminuye la erosión local en el extremo del espolón, se produce un mayor depósito de sedimentos adyacentes al talud de aguas abajo del espolón, se tiene un ahorro de 40% al 70% del material de construcción, se produce más rápidamente la sedimentación entre espolones y no han existido problemas de flaqueo o daños en el anclaje, aun espaciándolos cuatro veces la longitud de trabajo.

2.3.5 Pendientes laterales de los espolones

Antiguamente se construían espolones con la pendiente suave en la pared aguas arriba y pendiente fuerte aguas abajo, pero en los últimos años se ha cambiado totalmente el sistema, utilizando pendientes muy suaves a ambos lados. Generalmente la pendiente lateral varía desde 3H :1V a 5H :1V en la zona de la cabeza y un poco menos inclinados a medida que se avanza hacia la orilla. La corona o cresta se deja por lo general de 2 metros de ancho.

2.3.6 Angulo de orientación respecto a la orilla

La orientación de los espolones se mide por el ángulo que forma hacia aguas abajo, el eje longitudinal del mismo con la tangente a la orilla en el punto de arranque.

Se debe analizar tres tipos de espolones así:

2.3.6.1 Espolones inclinados hacia aguas arriba (ángulo $\alpha > 90^\circ$)

El sistema más popular en el mundo es el de colocar los espolones inclinados hacia aguas arriba, porque según los autores ellos producen el mejor efecto, en lo que se refiere a sedimentación de materiales y a desvío de la corriente de la orilla. A estos se les llama espolones deflectores porque según algunos autores repelen el flujo hacia el centro del cauce. La mayoría de las referencias en la literatura recomiendan inclinaciones entre 100° y 120° . Derrick (1998) recomienda limitar el ángulo de inclinación a 110° .

2.3.6 .2 Espolones inclinados hacia aguas abajo (ángulo $\alpha < 90^\circ$)

Estos espolones no son recomendados por algunos autores porque se argumenta que atraen el flujo hacia la orilla y por lo tanto nunca deben colocarse en la parte cóncava de las orillas. En cambio Maza recomienda ángulos de inclinación de 70° , porque según él se disminuye la socavación en la cabeza del espigón. Según Maza en un tramo recto, en una curva regular, conviene que los espolones formen un ángulo de 70° con la dirección de la corriente. Si la curva es irregular y aún más si tiene un radio de curvatura menor de $2.5B$, los ángulos de orientación serán menores de 70° y pueden alcanzar valores hasta de unos 30° .

2.3.6 .3 Espolones ortogonales al flujo (ángulo $\alpha = 90^\circ$)

Un espolón a 90 grados protege en forma similar los lados aguas abajo y arriba del espigón. Estos espolones son más cortos pero poseen menores ventajas de sedimentación que los inclinados hacia aguas arriba, sin embargo, son utilizados con frecuencia en los casos en los cuales se requiere controlar un canal navegable.

El arreglo entre espolones y la forma tienen efecto sobre la profundidad y posición del depósito, usualmente los espolones inclinados aguas arriba producen más sedimentación en su cara expuesta y viceversa. Los espolones en T son más eficientes pero su costo es mayor. La importancia del arreglo ó disposición de los espolones y su forma está vinculada al tamaño del material transportado. En casos de corrientes que transportan guijarros de buen tamaño es adecuado el uso de espolones inclinados hacia aguas abajo. En ríos anchos y de baja velocidad de corriente con acarreo de material fino, será suficiente con espolones de ángulo en contra de la corriente, para mayor efectividad.

2.3.7 Materiales de construcción

Para la construcción de espolones se utiliza una gran variedad de materiales, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Enrocado
- Gaviones
- Pilotes
- Madera o bambú
- Elementos prefabricados de concreto.

Demasiado complejo y variable es el fenómeno que se manifiesta en un curso natural de agua, para poder prever exactamente la situación que poco a poco se irá verificando, desde el momento de la implantación de las obras al de la estabilización definitiva del nuevo cauce. Esto requiere obras que puedan automáticamente adaptarse a la continua evolución del cauce que sean eficientes aún cuando el resultado final no sea exactamente aquel previsto, requisito éste, que se logra sólo en aquellas obras construidas con gaviones.

Es fácil modificar la obra utilizando la estructura de gaviones, permitiendo también la posible construcción gradual de las obras, alargándola y dándole mayor altura, en relación con el avance de la regulación del río. Se recomienda una especial atención en el amarre de las varias etapas de una obra.

Cuando se dispone de roca resistente y de bajo costo, se pueden seleccionar los espolones de montículo de roca conocidos como enrocado. Existen

muchas variaciones en las clases de relleno de roca y en la localización y proporción de estos materiales en un espolón de enrocados. En general un espolón como estos consiste de tres partes diferentes: la coraza (cubiertas primaria y secundaria), la primera capa inferior y la segunda capa inferior o corazón.

Cuando no hay roca natural disponible, o cuando esta no puede producirse en forma económica, o de tamaño suficiente para acorazar el espolón, pueden usarse como coraza bloques de concreto, o formas irregulares de concreto, como tetrápodos o tribarras, cuadrípodos o hexápodos..

Tetrápodos: son unidades de concreto precolado con cuatro patas en forma de cono truncado.

Tribarras: son unidades para coraza de concreto de forma especial, entrelazadas entre sí.

Cuadrípodos: son similares por su forma a los tetrápodos excepto que los ejes de las tres patas que forman la base están en el mismo plano.

Hexápodos: son unidades de seis patas en forma de cono truncado.

Los elementos deben colocarse en corma adecuada sobre el talud y entrelazarse unas con otras para formar una envoltura estable y con un ajuste razonablemente estrecho alrededor del corazón. Puede probarse en forma analítica, y por pruebas con modelos, que el peso requerido para las piezas individuales de roca de coraza variara con el grado de inclinación que se colocan; esto es, los taludes pronunciados requieren rocas más pesadas y los taludes más planos, roca más ligeras.

2.4 EFECTO DE LOS ESPOLONES

Como cualquier obra que se haga en un río, los espolones cambian su dinámica en todos sus aspectos, en la vida acuática, en su lecho y por consecuencia en su corriente; lo que también afecta las actividades como la pesca y la navegación. Por lo tanto se deben saber muy bien los efectos que tendrá la obra en el río para poder determinar si la obra es viable y no tiene consecuencias desfavorables para la naturaleza y la región.

Los espolones actúan sobre el campo de flujo de forma significativamente diferente en el caso de un solo espolón al caso de una serie de espolones, así como sus efectos morfológicos en el lecho del río.

2.4.1 Patrones de flujo en ríos con espolones

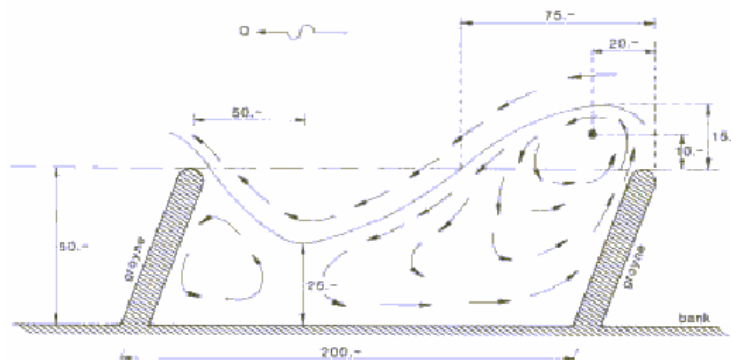


Figura 5. Flujo patrón en los espolones

Los espolones limitan y confinan el flujo principal a cierta parte de la sección del río y afectan apreciablemente la estructura cinemática del flujo en sus vecindades. Las velocidades aumentan así como los caudales específicos, debido a la disminución de la sección. En incremento en la velocidad conduce a un aumento del gradiente y una mayor intensidad de generación de macroturbulencias (Prezedwojski 1995).

El aumento de velocidad y la formación de remolinos o vórtices son las principales causas de la socavación alrededor de los espolones. Al golpear el agua con el espolón se forma un vórtice con un movimiento profundo de corriente hacia el cauce principal, formando una especie de rotación hacia fuera del agua.

A lo largo de la línea de separación aguas debajo de la cabeza del espolón se forman vórtices con ejes verticales, los cuales son conocidos como vórtices de Von Karman. Los vórtices de Von Karman actúan como pequeños tornados que succionan los sedimentos y ésta es una de las principales causas de la socavación junto a los espolones. Los vórtices más fuertes de Von Karman ocurren en espolones con paredes verticales atacados por flujos de alta velocidad.

2.4.2 Sistemas de circulación

Basado en modelos escala para espolones localizados a lo largo de una curva del río Klingeman (1984) reporto seis tipos de torbellinos patrones entre espolones

Tipo uno: El patrón de circulación de este tipo se distingue por que el flujo principal es deflectado fuera del campo del espigón, y un torbellino se desarrolla entre los espolones. Este torbellino se desarrolla y previene la penetración del flujo principal en el campo del espolón. Además, este patrón es deseable para la navegación ya que un canal continuo profundo es mantenido a lo largo de la cara del campo del espolón.

Tipo dos: En este tipo, un segundo torbellino aparece pero la corriente principal es mantenida fuera del campo del espolón.

Tipo tres: Como el espaciamiento entre espolones aumenta, en este tipo se desarrolla otro patrón de flujo. La corriente principal es dirigida dentro del campo del espolón creando un torbellino mucho más fuerte cerca del espolón aguas arriba, y más turbulencia a lo largo de la cara aguas arriba y en la cabeza más baja del espolón. Este tipo de corriente se forma para un valor de $S/L \cong 2.5$ y las velocidades medidas junto a la orilla son aproximadamente el 40% de las que se presentan para una protección de muro longitudinal junto a la orilla.

Tipo cuatro: Cuando se desarrolla este tipo de corriente la estabilidad que proporciona el espolón aguas arriba hacia el espolón aguas abajo desaparece y ocurre una corriente sencilla reversa que ataca directamente el segundo espolón. Este tipo de corriente se forma para un valor $S/L \cong 3.5$ y las velocidades medidas junto a la orilla son aproximadamente el 50% de las que se presentan para una protección de muro longitudinal junto a la orilla.

Tipo cinco: en este tipo el flujo, el cual es desviado por medio del espolón aguas arriba, es dirigido a la orilla del campo del espolón. Se forman torbellinos a ambos lados, proporcionando alguna protección para la orilla.

Tipo seis: Como el espaciamiento entre espolones además aumenta, el torbellino aguas abajo, el cual estaba proporcionando la protección al banco decae, y el flujo ataca el banco directamente.

En sus observaciones en el efecto de la geometría en el campo del flujo de un espolón, Uijtewaal (1999) concluyó que la longitud del campo del espolón a la relación del ancho determina el número y forma de torbellinos que surgen en la región del flujo estancado. Si ésta relación está cerca de la unidad da lugar a un solo torbellino, pero una relación más grande da espacio para dos torbellinos estacionarios, el más grande llamado torbellino

primario, en la parte aguas abajo del campo del espolón, y uno más pequeño surge cerca del espolón aguas arriba. El caso de longitud extrema del campo del espolón con una relación ancho longitud de seis, muestra la penetración del flujo dentro del campo del espolón. Los dos torbellinos permanecen en una relativa posición estable, mientras el flujo principal empieza a penetrar en el campo del espolón aguas abajo. En todos los casos, hay un torbellino destacado en la punta del espolón aguas arriba que viaja a lo largo de la interfase del canal principal y el campo del espolón y eventualmente surge con el primer torbellino.

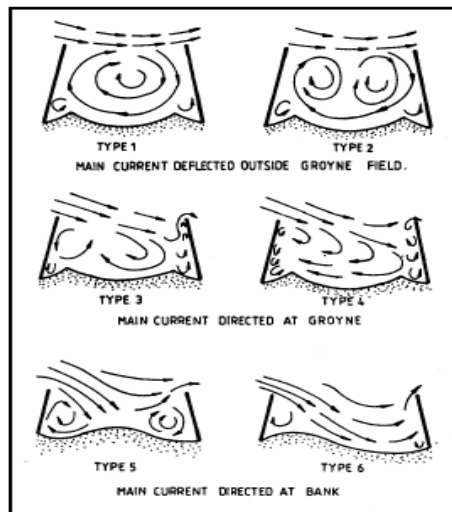


Figura 6. Variación de los patrones de flujo al aumentar el espaciamiento.

2.4.3 Efectos de los espolones en las corrientes secundarias

La presencia de los espolones reduce el área útil de un cauce, lo cual produce alteraciones en la forma y magnitud de las corrientes; tales cambios se deben básicamente a la mayor capacidad de arrastre de las corrientes, ya que éstas toman las partículas del fondo y las arrastran, variando las condiciones naturales del cauce.

En los espolones semipermeables, la corriente principal es desviada, dándole una curva hacia la banca en el que el dique se ha extendido. Tal curvatura es la causante de la depositación de sedimentos en esta orilla.

El alineamiento del espolón es otro de los factores determinantes en la forma de las líneas de las corrientes secundarias, ya que el grado de inclinación del espolón o grupo de espolones define la dirección de las corrientes. Tal es el caso de los espolones convergentes que desvían la corriente hacia el centro del río, por lo cual son llamados espolones repelentes.

Otro factor que influye en las corrientes secundarias es la separación entre los espolones; estas separaciones producen cámaras de frenado que disminuyen la velocidad e intensidad de las corrientes secundarias causando depositación de material y reduciendo a la carga de fondo.

En general, se han identificado dos tipos de corrientes secundarias generadas por los espolones, estas son las corrientes secundarias descendentes y los vórtices de eje vertical.

Las corrientes secundarias descendentes son causados por el impacto de las partículas de agua sobre cada espolón y son las responsables de la socavación observada a lo largo de su fundación, especialmente cerca del extremo expuesto a la corriente. Este tipo de corriente es similar a los vórtices de eje horizontal que se presentan en pilas de puente.

Los vórtices de eje vertical son generados por la separación del flujo cerca del extremo expuesto, que pueden ser estacionarios. Localizándose en el espacio entre espolones, o pueden despegarse del espolón y viajar hacia la orilla, si el espacio entre espolones es muy grande.

2.4.4 Efectos morfológicos de los espolones en un río

La erosión puede referirse a una multitud de procesos naturales, tales como la erosión de suelos, de costas, o de orillas de río. Esta puede resultar de un flujo de agua o aire, de acción de olas, etc. Para erosión localizada la palabra socavación es más apropiada, socavación en la cabeza de un espolón, en un estribo, o en la pila de un puente, etc. La extensión de un río también se puede socavar pero esta es llamada usualmente como degradación.

El término degradación, en contraste a la socavación, implica que el lecho del río baja su nivel, y esta se extiende sobre largas distancias. La degradación puede progresar en la dirección aguas abajo, aguas arriba, o en ambas direcciones. Usualmente, la degradación del lecho del canal esta acompañada por cambios en la pendiente del río.

Cuando una serie de espolones están contruidos, el lecho cambia cerca a ellos debido al efecto combinado de la degradación del lecho por la contracción y la socavación local al final de cada espolón. La degradación del lecho debido a la larga contracción en un canal aluvial así como, el fenómeno de la socavación local cerca de un solo espolón es diferente y ha sido discutida por muchos investigadores.

La degradación del lecho de un canal que esta originado por la construcción de una serie de espolones es normalmente tratada como una socavación debido a una larga contracción. El efecto que da la reducción del ancho del canal es que aumenta el esfuerzo cortante en el lecho, el cual resultaría en una considerable socavación dentro del alcance estrechado. Si la contracción es larga y permanente, la socavación se desarrolla a un alcance extendido del río (degradación) y afecta además el río entero.

3 SOCACION

3.1 ASPECTOS GENERALES

La socavación es el resultado de las alteraciones en el flujo producido por sistemas de vórtices de eje vertical y remolinos, que son los causantes del aumento y remoción de partículas, las que pasan de vórtice en vórtice en el sistema que se crean al obstaculizar el transcurso normal de las corrientes, obstáculo creado por estructuras hidráulicas tales como espolones.

La socavación comprende el levantamiento y transporte de los materiales del lecho del río en el momento de una avenida o creciente, o por la construcción de una obra dentro del cauce. Debe diferenciarse la socavación de la erosión no recuperable en el sentido de que después de que pase la avenida o se elimine la causa de la socavación en procesos posteriores, comúnmente se vuelven a depositar sedimentos en un proceso cíclico, y se puede recuperar el nivel del fondo del cauce. La socavación está controlada por las características hidráulicas del cauce, las propiedades de los sedimentos del fondo y la forma y localización de los elementos que la inducen.

De acuerdo al tipo de socavación, existen tres casos:

- Socavación estable
- Socavación de agua clara
- Socavación de lecho vivo

3.1.1 Socavación estable

La tasa de abastecimiento de sedimentos que entra al cuenco de socavación, es igual a la tasa de descarga de sedimentos del cuenco.

3.1.2 Socavación de agua clara

El flujo de sedimentos dentro del cuenco de socavación es cero. La erosión es continua y la profundidad de socavación aumenta con el tiempo hasta llegar a un valor límite, esta profundidad se encuentra cuando el esfuerzo cortante no es suficiente para evacuar más partículas. Esto ocurre porque el esfuerzo cortante real, es menor que el esfuerzo cortante crítico. Aguas arriba de la estructura existe una condición de umbral de movimiento.

3.1.3 Socavación de lecho vivo

Se caracteriza por el movimiento general del lecho debido a que el esfuerzo cortante real es mayor que el crítico. En este tipo de socavación, la profundidad depende de la relación que exista entre la tasa de suministro de sedimentos y la tasa de descarga de los mismos.

La profundidad a la que se llega al estado de equilibrio es la máxima cuando se está en medio de las dos condiciones mencionadas anteriormente, esto es, en la condición de umbral de movimiento, cuando la velocidad de aproximación U_a es igual que la velocidad crítica para la iniciación de movimiento del sedimento U_c .

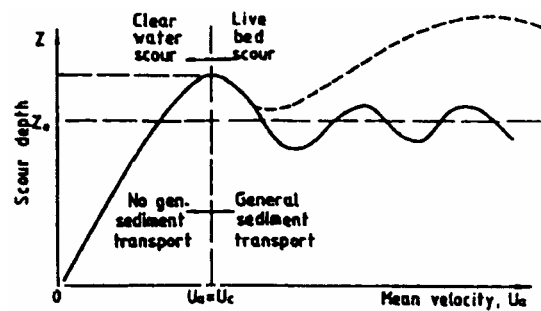


Figura 7. Variación de la profundidad de socavación con el aumento de la velocidad media

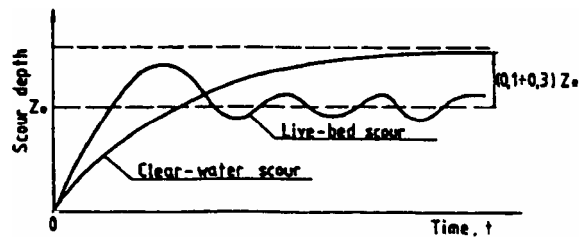


Figura 8. Profundidad de socavación versus tiempo.

La variación de la máxima socavación con el tiempo y la velocidad media de acercamiento U_a son mostradas en la grafica anterior. Ahí se muestra que la máxima profundidad de socavación bajo las condiciones de socavación de aguas claras, aunque es más profunda, necesita un tiempo relativamente largo para ser alcanzado. Socavación de lecho-vivo normalmente no es tan profunda, pero la socavación es más intensa. Después de un tiempo suficientemente largo un equilibrio de profundidad media (Z_e) es alcanzada; algunas fluctuaciones de profundidad de socavación en relación a Z_e son debido al pasaje de dunas.

Para determinar si el flujo aguas arriba esta transportando material del lecho la FHWA en su aplicación del HEC-RAS presenta la siguiente metodología. Este calcula la velocidad critica para empezar el movimiento V_c (para el diámetro de tamaño 50 del material del lecho) y comparar esta con la velocidad media V del flujo en el canal principal o aguas arriba del área sobre la orilla de la sección de la aproximación a la estructura.

Si la velocidad crítica del material del lecho es más grande que la velocidad media en la sección de aproximación ($V_c > V$), entonces la socavación por contracción de aguas claras es asumida. Si la velocidad del material del lecho es menor que la velocidad de aproximación en la sección ($V_c < V$), entonces la socavación de lecho vivo es tomada. Para calcular la velocidad crítica, se sigue la siguiente ecuación de Laursen (1963):

$$V_c = 10.95 y^{1/6} D_{50}^{1/3}$$

Donde V_c = velocidad crítica sobre el material de tamaño D_{50} y de menor tamaño. (Ft/s) (m/s).

Y_1 = profundidad promedio del flujo en el canal principal o en el área sobre la orilla de la sección de aproximación

D_{50} = partículas de material de lecho de tamaño en mezcla el cual el 50% son más pequeños.

Otra manera de determinar si el río está transportando material del lecho es por medio de la resistencia del suelo a la fuerza tractiva distinguiendo la socavación de aguas claras donde el esfuerzo cortante es menor que el esfuerzo crítico ($\tau_1 < \tau_c$) y para condiciones de lecho vivo ($\tau_1 > \tau_c$).

3.2 TIPOS DE SOCAVACION

Se conoce como socavación local, la socavación alrededor de estructuras hidráulicas tales como pilas de puentes, espolones, base de embarcaderos, etc. Los fenómenos de socavación local pueden ser clasificados teniendo en cuenta el proceso por el cual son causados. De acuerdo a este criterio, la socavación local presenta los siguientes cinco tipos:

1. Socavación general, consiste en el descenso del fondo del río cuando se presenta una creciente, debido a la mayor capacidad que tiene la corriente de transportar partículas en suspensión, las que toma del fondo del cauce. Esta puede ocurrir a todo lo largo y ancho del cauce durante el paso de una creciente.
2. Socavación causada por aumentos locales en la velocidad de flujo cosa que aumenta la capacidad local de transporte de sedimentos, Esto ocurre, por ejemplo, en contracciones en los ríos causadas por diques, pilas de puentes, etc.
3. Socavación en las zonas externas de las curvas causadas por flujos secundarios que arrastran material del fondo hacia la orilla interna de la curva. Este tipo de socavación se presenta en los meandros y puede afectar obras civiles construidas en las orillas.
4. Socavación local al pie de pilas, estribos o diques causada por la generación de vórtices o por el desvío de las líneas de corriente.
5. Socavación por impacto de chorros de agua en estructuras que generen algún tipo de caída.
6. Socavación en las bancas causadas por oleaje generados por vientos o por transito de embarcaciones.

La socavación local puede ser causada por dos o más de los mecanismos antes mencionados, cosa que hace que su análisis sea complejo.

3.3 SOCAVACION POR CONTRACCIÓN DEL CAUCE

Consiste en el descenso del fondo del cauce del río en aquellas secciones donde se reduce el ancho debido a la mayor velocidad de la corriente en esa zona. Esto ocurre cuando se construyen obras dentro del cauce como puentes o espolones. Se han realizado numerosas expresiones para determinar el nivel de socavación, de las cuales se distinguen las siguientes:

Método Richardson y Davis: Con base en las teorías desarrolladas inicialmente por Laursen (1963), Richardson y Davis (1995) obtuvieron la siguiente ecuación para determinar la socavación por contracción del cauce en función del diámetro medio efectivo de las partículas.

$$y = \left[\frac{0.025Q^2}{Dm^{2/3}W^2} \right]^3$$

donde: Q = caudal
 W = ancho del cauce
 Dm = 1,25D₅₀

Método de Komura:

$$\frac{\Delta z}{y} = (1 + 1.2Fr^2) \left[\left(\frac{W}{W_1} \right)^{2/3} - 1 \right]$$

donde: Δz = Socavación
 y = altura del cauce inicial
 W = ancho inicial
 W1 = ancho contraído
 Fr = Número de Froude

3.4 SOCAVACION EN LOS ESPOLONES

La socavación local en la punta de los espolones es de importancia durante su construcción cuando se utiliza elementos que están sueltos entre sí como los gaviones, bolsacretos. Si la velocidad de la corriente es mayor de 50 cm/s conviene recubrir el fondo sobre el que descansa la estructura.

Los espolones reducen el ancho efectivo del canal produciendo un cambio en el patrón seguido por la corriente. Este cambio en la corriente, que se manifiesta como vórtices, crea a su vez una modificación en la distribución del esfuerzo cortante alrededor del espolón originando un desequilibrio el cual se traduce en socavación local. La profundidad de socavación local debe ser relacionada al nivel de lecho socavado adyacente por el flujo contraído por los espolones, es decir la socavación local se sobrepone a las socavaciones general inducida por grandes descargas debido a la contracción.

En resumen la socavación en los espolones esta caracterizada por los siguientes factores:

- Relación de contracción
- Angulo de inclinación del espigón con respecto a la corriente
- Inclinación de los taludes o paredes del espolón
- El tamaño del sedimento parece ser importante solamente en la etapa inicial del proceso de socavación. Un proceso de socavación puede, por tanto ser prevenido proporcionando grandes tamaños de piedras alrededor del espigón.

- El proceso de socavación, se presenta al colocar un obstáculo (espolón) en el canal, que desvía las líneas de corriente creándose aumento en la velocidad local y sistemas de vórtices.
- El número de Froude de flujo antes del espigón es el parámetro más importante para determinar la profundidad de socavación máxima y la altura del montículo de depositación.
- El proceso de socavación es muy rápido al principio de y disminuye a medida que avanza este
- Para una tasa de transporte de sedimento (Q_b) constante a mayor número de Froude, menor es la profundidad de socavación. A mayor altura de lamina de agua (Y_o), mayor es la profundidad de socavación.
- Para Q_b constante, a mayor número de Froude, mayor es la altura del montículo. A mayor profundidad menor es la altura del montículo
- A mayor caudal mayores la profundidad de socavación. Con relación al montículo de depositación la tendencia es que a mayor caudal, menor es la altura del montículo.

3.5 CALCULO DE LA SOCAVACION EN ESPOLONES

Se han desarrollado mas de veinte formulas para calcular la socavación alrededor de espolones. La mayoría de estas formulas son derivadas de experimentos en modelos hidráulicos de pequeña escala y por lo tanto deben utilizarse con mucho cuidado.

Las formulas planteadas se presentan a continuación:

Tabla 3. Ecuaciones para el cálculo de la profundidad relativa de la cavidad de socavación $H'=(h+z)/h$; donde h es el nivel de aguas medidos a partir del nivel del lecho sin socavar y z es la profundidad socavada.

No formula	Autor Año	Ecuación	Rango de viabilidad
1	Koshla (1936)	$H' = \frac{h+z}{h} = \frac{0.9q^{2/3}}{hf_1^{1/3}} = const_3 \sqrt{\frac{Fr^2}{f_1}}$ <p>donde $q= Q/B$ $f_1 =$ coeficiente de Lacey</p>	
2	Ahmad (1953)	$H' = k' \frac{q_1^{2/3}}{h}$	$0.2 \leq D \leq 0.7mm$ $h \geq 0.06m$
3	Altunin and Buzunov (1953)	$H' = k'_\alpha k'_m k'_n$ <p>ver figuras 10, 11 y 12.</p>	$30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $0 \leq m \leq 3$ $0.1 \leq n \leq 0.8$
4	Garde et al. (1961)	$H' = f_1(Cd) \frac{(Fr)^{f_2(Cd)}}{1-n}$ <p>para $f_1(Cd)$ y $f_2(Cd)$ ver figura 9</p>	$B=0.61m; m=0$ $0.3 \leq D_{50} \leq 2.2mm$ $0.1 \leq Fr \leq 0.8$ $0.1 \leq n \leq 0.47$ $60 \leq t \leq 180min$
5	Mukhamedo (1971)	$H' = 15.1 \frac{sen^{1/4} \alpha \cos^{1/2} \beta}{(1-n) \left(\frac{D_{85}}{D_{50}} \right)^{1/6}} \times \frac{Fr^{0.9}}{(1+0.09Cs)(1+1.08Fr^2)^{1.5}}$	Comprobada para ríos en Asia central, $n \leq 0.6$ $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $0 \leq m \leq 1.75$ $0.4 \leq D \leq 7.7mm$ $1 \leq Cs \leq 7kg/m^3$ $0.2 \leq Fr \leq 0.9$

No formula	Autor Año	Ecuación	Rango de viabilidad
6	Gill (1972)	$H' = 8.375 \frac{\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0.25}}{(1-n)^{0.857}}$ $\tau = \tau_c$ $0 \leq C_s \leq 0.45 \text{ kg/m}^3$	<p>B=0.76m; m=0; $0.9 \leq D \leq 1.5 \text{ mm}$ $2.6 \leq h \leq 10 \text{ cm}$ $0.2 \leq Fr \leq 0.8$ $D_{60} / D_{10} = 1.4$ $0.13 \leq n \leq 0.4$</p>
7	Das (1976)	$H = 0.56 * 10^{(0.602n - 0.0294)} \left(\frac{h}{D}\right)^{0.29} Fr^{0.85}$	<p>B=2.3m; $\alpha=90^\circ$ $0.1 \leq n \leq 0.9$ $5.5 \leq h \leq 11.6 \text{ cm}$ $0.25 \leq D \leq 1.6 \text{ mm}$ $0.05 \leq Fr \leq 0.6$ $50 \leq t \leq 230 \text{ min}$</p>
8	Nelly (1973,1980)	$H' = \frac{2.1 \div 2.75}{h} \left(\frac{2.5q^2}{D^{0.318}}\right)^{0.333}$	<p>$0.1 \leq D_{50} \leq 200 \text{ mm}$ h en m; D en mm; q en ($\text{m}^3/\text{s}, \text{m}$)</p>
9	Buy Ngok (1981)	$H' = \frac{1.09 \exp[-0.075(m_s + 1)]}{(1-n)^{0.3}}$ $x \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{0.2} \left(\frac{h_g}{h}\right)^{0.41} f_1(Cd)(Fr)^{f_2(Cd)}$ <p>para $f_1(Cd)$ y $f_2(Cd)$ ver figura 9</p>	<p>B=0.75 y 1.0 m $0 \leq m_s \leq 3; m_g = 0$ $0.1 \leq n \leq 0.6$ $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $0.5 \leq h_g / h \leq 1$ $0.33 \leq D \leq 8.3 \text{ mm}$ $0.12 \leq Fr \leq 1.6$ $t = 360 \text{ min}$</p>

Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de la máxima profundidad de la cavidad de socavación $H = z/h$.

No. formula	Autor año	Ecuación	Rango de validez
10	Liu (1961)	$H = \frac{z}{h} = k_m \left(\frac{L_p}{h} \right)^{0.4} (Fr)^{0.33}$	B=1.2 y 2.4 m. D ₅₀ =0.6mm
11	Richardson (1975)	$H=4Fr^{0.33}$	Para Mississippi donde (Lp/h >25)
12	Laursen (1963)	$\frac{L_p}{h} = 2.75H \left[0.087(H+1)^{1.7} - 1 \right]$	Confirmado por pruebas en modelos escala pequeño por Suzuki (1987)
13	Maglakelidze (1968)	$H = 0.56 \left(\frac{\alpha}{90^\circ} \right)^{1/3} \frac{1 - 0.285ms}{1 + 0.09Cb} \times \left[\frac{(U/w)^{0.75}}{0.07 + h/L_p} \right]$	15° ≤ α ≤ 165° 0 ≤ m ≤ 3.5 1.5 ≤ D ≤ 5.2 1 ≤ Cb ≤ 7kg/m ³ 0.02 ≤ h/Lp ≤ 0.25 44 ≤ t ≤ 1.65min
14	Muromov (1970)	$H = \left(\frac{\alpha}{90^\circ} \right)^{1/3} (1 - 0.285ms) \times \left[\frac{1.8}{0.05 + h/L_p} + \frac{L_p(U - U_c)}{50hw} \right]$	0.3 ≤ B ≤ 3.5m 15° ≤ α ≤ 165° 0 ≤ ms ≤ 2.75 0.2 ≤ h/Lp ≤ 4.0

No. formula	Autor año	Ecuación	Rango de validez
15	Papashvili	$H = K_{\alpha} (1 - 0.285m)$ $\times \frac{\left[1 + k \left(\frac{Lp}{h} \right)^{1/3} Fr \right] \frac{Uc}{U} - 1}{\left[1 + 0.154Cb \left(\frac{D50}{D95} \right)^{1/2} \right]^{1/2}}$ $K_{\alpha} = \left[\tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]^{0.27} \quad 0 \leq \alpha \leq 90$ $K_{\alpha} = (\text{sen} \alpha)^{0.125} \text{ para } 90^{\circ} \leq \alpha \leq 180^{\circ}$ $K = 1.7 + 0.2 \sqrt{\frac{Lp}{h}} \text{ para } n \leq n_c = \frac{1}{3} \left(\frac{Lp}{h} (Fr)^2 \right)^{-0.083}$ $K = 1.7 + 0.2 \sqrt{\frac{Lp}{h}} + 0.2 \left(\frac{n}{n_c} \right)^2 \text{ para } n_c \leq n \leq 0.7$	$B = 0.8y_{1.0m}$ $0 \leq m \leq 35$ $0.02 \leq h/Lp \leq 0.3$ $15 \leq D \leq 52mm$ $1 \leq Cb \leq 7K/m^3$ $180 \leq t \leq 300min$ $0.6 \leq Fr \leq 1.18$
16	Cunha(1976)	$H = 189 \left(\frac{Lp}{h} \right)^{0.69} \left(\frac{u_{\infty}}{w} \right)^{3.25} t^{0.16} \text{ para } 10^{-19} \leq \left(\frac{u_{\infty}}{w} \right)^{20.3} t \leq 10^{-12} y$ $200min \leq t \leq 6dias$	$b = 2.0m, \alpha = 90^{\circ}$ $ms = mg = 0$ $1.6 \leq D \leq 5.6mm$ $0.05 \leq n \leq 0.15$ $0.2 \leq h/Lp \leq 1.0$ $[t(dias)]$
17	Zaghloul (1983)	$H = \frac{2.62 (Fr)^{2/3}}{(180^{\circ} - \alpha)^{0.043} 1 - n}$	$10 \leq h \leq 30cm$ $30^{\circ} \leq \alpha \leq 150^{\circ}$ $0.18 \leq Fr \leq 0.48$ $0.1 \leq n \leq 0.5$ $m = 0; D \geq 4.5mm$ $180 \leq t \leq 4320min$

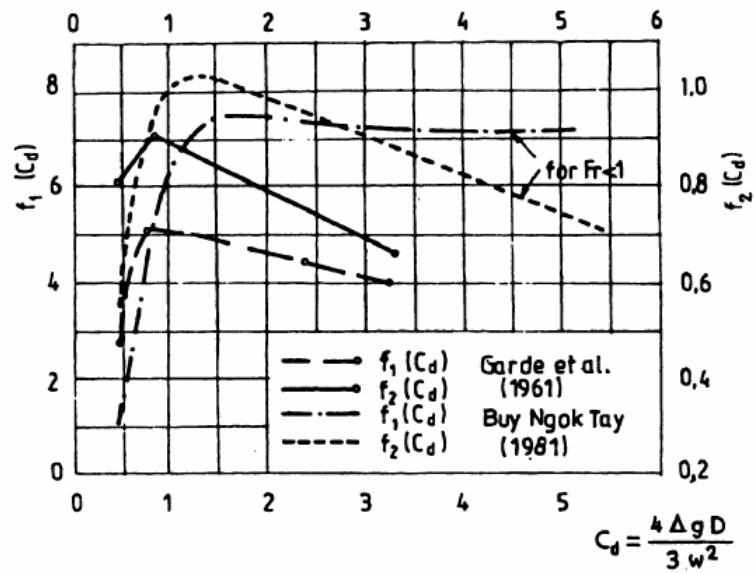


Figura 9. Valores de factores dependientes del coeficiente del grano arrastrado.

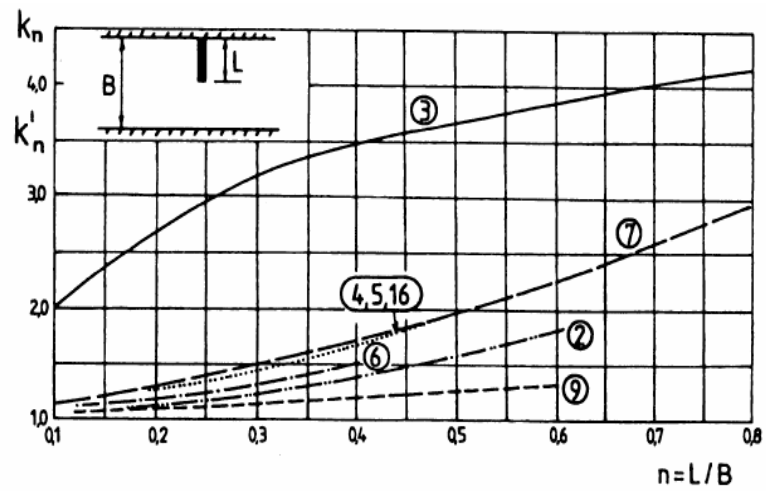


Figura 10. Efecto de la relación de contracción en la profundidad relativa socavada (el número de línea es referido en las tablas 3 y 4)

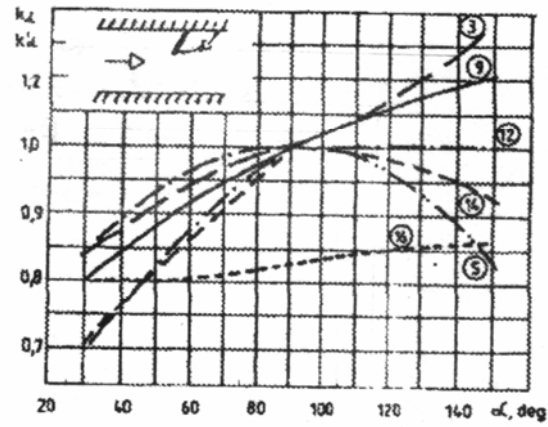


Figura 11. Efecto del ángulo de inclinación del espolón en profundidad de socavación alrededor de su punta (los números de las líneas son referidos en la tabal 3 y 4)

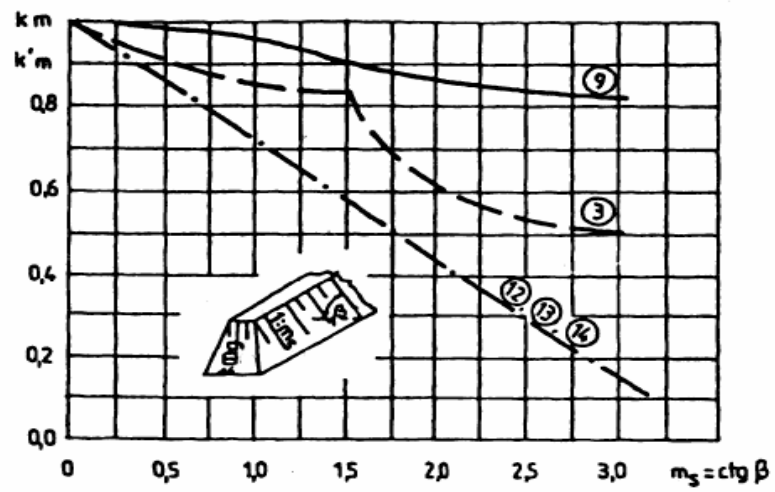


Figura 12. Efecto de pendiente del talud en la profundidad relativa (los números de líneas son referidos en las tablas 3 y 4)

Tabla 5. Valores de los coeficientes k' de acuerdo a Ahmad (1953)

Posición relativa del espolón con el canal	K'
1-Espolón antes de una orilla cóncava, acompañada por de un remolino detrás de la curvatura convexa	Entre 2 y 2.25
2-Espolón en una curvatura moderada, sin remolinos	Entre 1.5 y 1.75
3-Espolón recto inclinado con el flujo un ángulo entre 30 y 90 grados	Entre 1.2 y 1.5
4-Espolón haciendo un ángulo con el flujo entre 90 y 150 grados	Entre 1.5 y 1.75

3.5.1 Profundidad de socavación local para una serie de espolones

Cuando una orilla es protegida con una series de espolones, la profundidad de socavación varia con la localización del espolón. La profundidad de socavación local cerca de un espolón que esta lejos aguas abajo del primer espolón es diferente de un solo espolón. Sin embargo, la profundidad de socavación alrededor del primer espolón es similar al que esta solo. Debido a la influencia de la vecindad de los espolones, la profundidad de socavación usualmente se convierte más pequeña que la de un solo espolón. Suzuki (1987), mostró a través de experimentos de laboratorio, que la socavación local alrededor de un espolón localizado lejos aguas abajo en una serie de espolones es una función de la relación del espaciamiento del espolón (S) y

la longitud (L), y esta podría ser expresada aproximadamente en la siguiente forma:

$$\frac{Z_{s,DS}}{Z_{s,I}} = 0.07 * \frac{S}{L} + 0.14 \quad \text{para } 2 < S/L < 10$$

Donde:

$Z_{s,DS}$ = profundidad de socavación alrededor de un espolón lejos aguas abajo

$Z_{s,I}$ = profundidad de socavación del primer espolón el cual es similar a la socavación cerca de un sencillo espolón y podría ser estimada usando cualquier de las formulas anteriormente mencionadas.

4 CARACTERISITICAS DEL RIO MAGDALENA

El Río era manejado en sus aspectos de navegabilidad por el Ministerio de Obras Publicas y en sus aspectos ambientales por el INDERENA. El río Magdalena con su estructura portuaria fue transferido a la Corporación Autónoma del Río Grande de la Magdalena, mediante la Ley 161 de 1994; Sin embargo CORMAGDALENA no posee el presupuesto ni la infraestructura necesaria para realizar eficientemente el manejo del Río Magdalena y su principal labor ha sido la de manejar por un sistema de mantenimiento la navegabilidad del Río y en la practica no se está realizando un manejo real de los diversos problemas del río. Uno de estos problemas es el de inestabilidad de las orillas por efectos naturales y antropicos. Tal vez el sector mas intervenido del río es el sector entre punta Carmelitas y Galán, frente a Barrancabermeja, en el cual el río presenta actualmente unas características tales, que están amenazando la estabilidad de las obras de infraestructura construidas por ECOPETROL especialmente.

4.1 EL MEDIO NATURAL

4.1.1 Aspectos Climáticos

Todo el Valle alto y medio del Río Magdalena está ubicado en el piso térmico cálido pues comienza al sur de Huila a una altura superior a los 400 metros sobre el nivel del mar y va descendiendo en forma tal que en Girardot está a 250 metros de altura, en Honda a menos de 200 metros, en Barrancabermeja a 75 metros y en la Gloria alcanza los 25 metros con

respecto al mar. (I.G.A.C. – 1982) En estas condiciones la temperatura promedio anual es superior a 24°C en todo el territorio.

Desde el punto de vista de la humedad, la cual resulta del balance entre las lluvias que caen en determinada región y el agua que se pierde por evaporación y transpiración, hay una marcada diferencia entre el sector alto del Valle y la zona media. El Valle de la Magdalena desde su comienzo al sur de Neiva hasta un sector localizado al norte de Honda, más o menos a mitad de camino entre esta población y la Dorada pertenece a una provincia subhúmeda cuyo promedio anual de lluvia está entre 1000 y 2000 milímetros. Un área al norte de Neiva entre Tello, Villavieja y Colombia (Huila) tiene características de mayor sequedad y corresponde a una provincia semiárida cuyo punto más marcado está, precisamente, en la zona de Colombia en un recodo del Valle del Magdalena. En esta región la precipitación desciende notablemente por debajo de los 1000 milímetros anuales y en el caso particular del enclave muy seco de Colombia (Huila) esta cifra puede ser inferior a los 500 milímetros. (I.G.A.C.-1982).

Al estudiar el clima de la cuenca del río Magdalena, en ambiente tropical, se comprende que el caudal del río no puede ser constante, ya que este depende de los inviernos y veranos en los cuales se pueden definir dos épocas de disminución de caudales: de diciembre a marzo y de julio a agosto, a tiempo que las crecientes aparecen en abril y mayo y entre septiembre y noviembre; adicionalmente cada veinticinco a treinta años, aparece un ciclo invernal de intensidad muy por encima del normal que incide en una forma determinante en el comportamiento general del río modificando la conformación de los canales principales del río.

La zona media del Valle del Magdalena está enmarcada en su mayor parte, en una provincia húmeda con un área intermedia entre una región al norte de

Puerto Berrío y otra al sur de Barrancabermeja, de clima muy húmedo (provincia perhúmeda. En este sector norte del Magdalena Medio en los departamentos de Cesar y Bolívar el clima es transicional hacia seco. En la provincia húmeda la precipitación pluvial es mayor de 2000 milímetros anuales. (I.G.A.C. –1982) En el sector perhúmedo, aunque no hay datos climatológicos, se presume que las lluvias superan los 3500 o los 4000 milímetros anuales.

4.2 MORFOLOGIA Y DINAMICA FLUVIAL

Se basó en estudios realizados por HIDROTEC (Febrero 1971) para Shell Córdor»Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del MOPT que trabaja en la zona desde 1973 y en el estudio hidráulico ejecutado por la Universidad Nacional para ECOPETROL (Noviembre/86).

El río Magdalena es joven y su cauce todavía no ha sido labrado definitivamente y, al correr sus aguas por entre suelos aluviales, estimuladas frecuentemente por intensos inviernos, rompe aquí y allá barreras y se lanza en forma descontrolada anegando campos, erosionando orillas.

Los procesos de erosión-sedimentación del río Magdalena están en función de la energía de la corriente y de la resistencia del material sobre el cual escurre el flujo.

La capacidad erosivo del río disminuye a medida que profundiza su cauce al encontrar, progresivamente, material mas resistente, lo cual hace que su energía se concentre sobre los niveles superiores o mas erodables en donde amplía su cauce con facilidad, mientras que su profundidad o entallamiento vertical queda restringida por la presencia de unidades arcillosas masivas

”estratificadas” de alta resistencia a la desintegración y erosión por socavación.

El río progresivamente arrastra arenas y sedimentos finos y los distribuye y reacomoda sobre su lecho y orillas iniciales de acuerdo con la variación de la energía de la corriente, formando así depósitos de barras de arena laterales y de fondo, las cuales ocasional y temporalmente pueden conformar las orillas del río. Estas orillas son continuamente modificadas con los cambios de energía de la corriente. En épocas de aguas mínimas y medias la corriente se distribuye irregularmente sobre los depósitos del lecho, conformando laminas de agua de espesores muy reducidos.

En épocas en donde el agua sube hasta la base del nivel arenoso de los depósitos “estratificados”, produce una fuerte y centrada erosión por socavación originando un retroceso de la orilla en este nivel, ampliando el ancho superior del cauce. En épocas de máximas avenidas el agua sobrepasa la altura de las orillas y ocurre, por consiguiente, el desbordamiento.

Aguas arriba de Barrancabermeja la característica que presenta el río es de un río trenzado de características muy complejas integrándose con los caños de entrega de los ríos Opón y La Colorada. Los cambios que se conocen se refieren a las frecuentes variaciones de la profundidad y anchura de los canales, con el correspondiente corrimiento de las orillas y la formación crecimiento o destrucción de islas. Sobre este sector el área de divagación de las trenzas del río vuelve a tener un nuevo giro hacia el occidente ayudado por los materiales duros de color rojo que forman la terraza de Barrancabermeja.

En el sector de Punta Carmelitas la Margen izquierda del Río Magdalena corta lateralmente rocas de origen Terciario, las cuales actúan como control geológico y direccionan el río hacia el oriente sobre el área de islas y zonas de inundación de la desembocadura del Río Opón. Este direccionamiento se ha acelerado en los últimos años por influencia de las obras de defensa del dique de Casabe (Espolones), construidos por ECOPETROL en la margen izquierda del Río, desde Puerto Pinto hasta aguas arriba de Punta Carmelitas y consecuentemente el río Magdalena ya no puede divagar hacia la margen izquierda como era la condición natural del Río antes de la construcción del dique y sus espolones.

Desde el año 1923 (época más antigua de la cual se tiene información) hasta la fecha, en la zona Carmelitas-Puerto Casabe se presenta un proceso erosivo intensivo y cada vez más acentuado sobre la orilla izquierda del río Magdalena; paralelamente se ha presentado un proceso de depositación sobre la margen derecha aguas arriba y frente al muelle de Barrancabermeja, favoreciendo la formación de islas que modifican la dinámica del río desviando el cauce principal de flujo hacia la zona del campo de Casabe con los ya conocidos problemas de erosión, corrimiento de orillas y ataque al dique marginal que protege al campo de las inundaciones durante las crecientes del río Magdalena

4.3 PROBLEMAS GENERALES DEL RIO

Son múltiples los problemas que presenta el Río Magdalena, especialmente en su curso medio y en la parte baja y, mas concretamente, de Barrancabermeja hacia su desembocadura. Esta zona del río es a la que se han dirigido la mayoría de los estudios realizados por los especialistas y técnicos nacionales y extranjeros, en los cuales se han planteado soluciones, teóricamente factibles pero que, al enfrentarse a la realidad, resultan muy

costosas, por la magnitud de los problemas y el comportamiento impredecible del río (Acevedo Latorre- 1981).

Dentro de este cúmulo de problemas, algunos importantes, sin que sean los únicos están, primero las grandes avenidas producidas por los intensos inviernos, segundo las épocas de fuertes sequías en que el nivel de las aguas baja considerablemente y el río no tiene suficiente poder de arrastre para llevarse la gran cantidad de material flotante que se va depositando y formando peligrosos escollos al tráfico fluvial y finalmente la erosión de las márgenes que representa una amenaza para las obras de infraestructura construidas junto al Río.

4.4 RESISTENCIA DE ORILLAS

El valle de las subsectores del río Magdalena entre Puerto Berrío y Barrancabermeja presenta una geoforma común, plana, horizontalizada e integrada por depósitos antiguos y depósitos recientes o temporales, los cuales se extienden lateralmente hasta el borde de las geoformas acolinadas que están constituidas por unidades rocosas estratificadas, en posición horizontal o ligeramente inclinadas.

El río discurre sobre material de deposito desplazando, ocasionalmente, sus orillas hasta el borde del valle de acuerdo la erodabilidad de los taludes desarrollados sobre los depósitos.

La estabilidad de las orillas del río esta en función de las características litoestructurales del material en contacto con el río; por consiguiente para la caracterización de estabilidad de los taludes de orillas, el material se clasifica en dos grupos así:

- Material de colinas que bordean el valle, constituido por unidades de roca estratificada correspondiente a las formaciones Mesa y/o Real.
- Material de depósito, el cual puede ser antiguo estratificado y reciente o temporal o de barras de arenas o material arcillo-limoso orgánico.

La formación Mesa esta constituida por areniscas y conglomerados con interestratificaciones de argilitas de color crema rojizo, en niveles gruesos. Las areniscas son friables, parcialmente ferroginosas. Los conglomerados son polimícticos, integrados por grava, cantos y bloques redondeados a esféricos, de rocas ígneas de diferente composición, rocas sedimentarias y ocasionalmente rocas metamórficas

Los conglomerados localmente se encuentran en un intenso grado de meteorización. Los fragmentos redondeados y/o esféricos de rocas ígneas, predominantemente de origen volcánico, han perdido su consistencia original, adquiriendo un comportamiento arcillo-arenoso. Estos taludes presentan una alta susceptibilidad a la socavación, proceso erosivo que ha actuado con mucha intensidad generando desprendimientos por colapso de la parte superior del talud, desplazando la orilla del río rápidamente hacia la población, donde los conglomerados tienen un bajo, o ningún grado, de meteorización y constituyen taludes resistentes a los procesos erosivos.

La formación o Grupo Real esta integrada por areniscas de grano fino a medio, de color crema-amarillo. Se presentan en estratos delgados de 0.1 a 0.3 m de espesor. Areniscas conglomeráticas y/o conglomerados finos. Arcillolitas de color crema, parcialmente oxidadas. Estos están fuertemente confinadas y presentan alta resistencia a los procesos erosivos, conforman taludes altos, verticalizados y muy estables.

El material de depósito antiguo, que presenta “estratificación”, está integrado por tres (3) niveles:

- Hacia la base y suprayacente a las unidades Real y/o Mesa aflora un nivel de arcillas de color gris, con alto grado de compactación, desarrollando superficies bien definidas de estratificación.

Este nivel arcilloso se encuentra en posición horizontal y presenta alta resistencia a los procesos de erosión, especialmente a la socavación; forma taludes verticalizados, los cuales presentan mínimo desplazamiento lateral de la orilla del río y constituye orillas permanentes.

- Sobre el nivel anteriormente descrito yacen arcillas arenosas, las cuales también han adquirido un alto grado de compactación, Se encuentran en capas de 0.8 a 1.0 m de espesor. Conforman taludes verticalizados, son de color gris, parcialmente oxidadas. Presentan remanentes de raíces y elementos vegetales.

Este nivel, intermedio en el talud, es más susceptible a la erosión que el nivel infrayacente, pero mucho menos que el suprayacente. Por cambios de humedad adquiere discontinuidades, las cuales delimitan bloques que por acción de la corriente se desestabilizan y caen. La orilla del río sobre este nivel sufre desplazamientos laterales.

- Finalmente, hacia la parte superior del perfil del depósito “estratificado” aflora un nivel constituido por arenas cuarzosas, sueltas o débilmente compactadas, de máxima susceptibilidad a la erosión por socavación.

Cuando el agua del río se pone en contacto con el nivel arenoso produce una intensa erosión y el talud retrocede rápidamente.

Como resultado de las diferentes resistencias a la erosión en los niveles del depósito “estratificado” se genera un talud escalonado, siendo cada vez más anchos los escalones sobre los niveles arcillosos

El material del depósito temporal corresponde a aquel depositado recientemente dentro del propio cauce del río, como en el caso de las barras de arena, las cuales ocupan cualquier lugar del cauce. Algunas de estas acumulaciones se han cubierto de vegetación, adquiriendo un grado de consistencia y resistencia a los eventos erosivos de la corriente, conformando islas perdurables.

La mayoría de las acumulaciones de arena son transitorias, siendo su desplazamiento una función de la energía de la corriente. La fuente de este material arenoso es el nivel superior de los depósitos “estratificados” y parcialmente de las vertientes del río constituyéndose en orillas muy inestables o temporales del río.

Los depósitos recientes de limos arcillosos orgánicos conforman taludes muy inestables. En las orillas del río este material se desprende y origina un continuo y rápido retroceso del talud.

4.5 CONTROLES GEOLÓGICOS

4.5.1 Sector Peñas Blancas-Punta Carmelitas

Este control geológico consiste en una serie de colinas de baja altura que aparecen en forma puntual y continua, en una longitud de aproximadamente 10 kilómetros entre Peñas blancas y Carmelitas, las cuales cambian la dirección del río pasando de N42E a aproximadamente N64E. Dicho control

corresponde al afloramiento de arcillolitas abigarradas amarillo grisáceas con manchas naranjas de óxidos de hierro, las cuales no poseen buzamientos apreciables y corresponden a la parte superior del Grupo Mesa, al que se le ha calculado un espesor de 250 metros en la región.

Afloramientos de esta litología se encuentran sobre el margen izquierdo del río, siendo importante el que se tiene en la punta anterior (aguas arriba y sobre el mismo margen) a punto Carmelitas, en donde se levanta un pequeño cerro de morfología suave con un escarpe vertical de 5 metros sobre el nivel del río. Este direccionamiento del río envía el Canal principal en dirección hacia las islas de la desembocadura del río Opón.

El ángulo de direccionamiento depende del comportamiento del Río en el sector del control geológico y la localización del canal principal con relación a punta Carmelitas como se indicó en el capítulo anterior.

4.5.2 Islas y Caños junto a la desembocadura del Río Opón

Estas islas compuestas principalmente por arcillas y limos resistentes a la erosión de la corriente hacia el oeste, dependiendo de la capacidad de los caños del río Opón para recibir las corrientes. Cuando las corrientes son asimiladas por los años, estos se amplían y la corriente principal del río se acerca a la orilla derecha en Barrancabermeja.

El crecimiento de las islas por procesos de sedimentación tanto por el río Magdalena, como por el río Opón ha sido muy fuerte en los últimos 40 años lo cual ha generado un estrechamiento de los brazos o caños, con el consiguiente direccionamiento del río hacia la margen izquierda. Sin embargo los procesos de dragado en el muelle público de Barrancabermeja

han generado una rehabilitación retrogresiva de los caños, generando en los últimos años una concentración de caudales hacia la margen derecha del río.

4.5.3 Meseta de Barrancabermeja, sector Hotel Pipatón

El pequeño cerro en el que se encuentra ubicado el Hotel Pipatón y parte del sector comercial de Barrancabermeja, constituye un punto de control geológico importante, desviando el Río Magdalena que lleva el curso Sur-Norte a N40W y controlando además, la desembocadura del caño Cardales. Antes de 1977 el cauce principal del río golpeaba frontalmente este control geológico y el Río era desviado por este hacia la orilla izquierda en el estrechamiento de Galán, sin embargo se prolonga hacia el Este bordeando el caño Cardales y sobre él se presenta un escarpe subvertical de aproximadamente 10 metros de altura.

La litología que constituye el cerro corresponde a un conglomerado matriz de cantos muy bien redondeados, de esfericidad media a alta y principalmente de areniscas, cuarzo, limolitas, rocas ígneas y metamórficas, todos estos, embebidos en una matriz areno arcillosa de color amarillo naranja. Este conglomerado hace parte del Grupo Real que posee un espesor variable en muchos sectores, siendo el de su sección tipo de 4054 metros; es importante anotar además, que en esta zona el conglomerado se encuentra dispuesto aproximadamente de forma horizontal.

4.5.4 Estrechamiento de Galán

El sector de Galán se encuentra en un estrechamiento del cauce del río, formado por puntos geológicamente resistentes a la acción erosiva del agua, por lo cual en los últimos 40 años siempre ha actuado como una sección de

control. Estos materiales son arcillas orgánicas, colores gris y negro, de consistencia blanda. Aunque este punto ha actuado como control del río, se han presentado en los últimos 20 años problemas de erosión de las orillas, a pesar de que se han construido espolones y barreras de bloques de concreto, pilotes y hexápodos. Más que un punto de control geológico, el estrechamiento de Galán se debe considerar como un punto amenazado por el río.

4.6 CONTROLES ARTIFICIALES

A medida que el área de Barrancabermeja ha progresado, especialmente por la construcción de obras de infraestructura petrolera tanto en los campos de Galán y Casabe como la refinería, etc. , se ha buscado proteger las orillas del Río contra las inundaciones, la erosión y la sedimentación; para ello se han construido una serie de protecciones tanto en la ribera como dentro de su cauce buscando con ello darle un manejo al Río Magdalena. Adicionalmente se han construido una serie de muelles de diferentes formas con sus respectivas obras de defensa (Tablestacados, espolones, etc.) Para ello se han construido las siguientes protecciones o controles artificiales:

Tabla 6. Controles artificiales del río

Protección	Año
Dique Marginal de Campo Casabe para control de inundaciones.	1944
Dique Marginal	1954
Muelle público de Barrancabermeja.	1954
Muelle ECOPETROL	1954
Muro de canecas frente a la Estación Galán	1972
Camarones y espolones Puerto Casabe- Primera etapa	1977 a 1985

Protección	Año
Espolones con hexápodos Puerto Casabe-Puerto Pinto-Segunda etapa	1977 a 1980
Muro de canecas frente a la Estación Galán	1954
Espolones campo Galán	1987
Tablestacados Complejo Industrial	1987
Defensas Metálicas	1987
Espolones con hexápodos-Carmelitas	1991
Pantallas Rígidas Sumergidas-Fondo del Río frente al CIB	1993

4.7 MATERIAL DEL LECHO

4.7.1 Granulometría

El lecho del río está cubierto por material de arrastre, el cual es arenoso que forma barras laterales y de fondo. Su granulometría fue determinada por una serie de sondeos efectuados por diferentes estudios realizados en el sector de Barrancabermeja, debido a las múltiples obras ejecutadas como los dragados, obras de defensa contra la erosión, sondeos realizados para el puente en construcción que comunicará Barrancabermeja con Yondó, etc.

Se recolectó la siguiente información del informe #1 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL RIO MAGDALENA FRENTE A LA ESTACION GALAN Y PLANTA DE PROPANO, ELABORADO POR LA EMPRESA DE INGENIERIA DE SUELOS LTDA INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE DESLIZAMIENTOS Y EROSION PARA ECOPETROL, 1997 en el cual se establece que en Octubre de 1983, con el fin de esclarecer los bajos rendimientos observados en el dragado que la firma subcontratista estaba ejecutando frente al muelle de Aromáticos de Barrancabermeja, la Unidad de

Estudios Fluviales BEX-Hidroestudios S.A. encontró que de 13 muestras tomadas, la parte fina correspondía a arenas medias a gruesas con un $d_{50}=1$ mm y la parte gruesa corresponde a gravas finas con arenas gruesas y medias con un $d_{50}=7$ mm. Estas granulometrías de las muestras tomadas generalmente en el fondo del río contrastan totalmente con las granulometrías de las arenas y limos en la superficie de las barras o playones las cuales son generalmente arenas muy finas, uniformes con d_{50} de aproximadamente 0.1 milímetros. Esta diferencia de granulometría entre el fondo del río y los playones explica la diferencia en resistencia a la erosión.

En el informe de HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN, ESTUDIO Y DISEÑOS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO MAGDALENA EN LA CARRETERA BARRANCABERMEJA –YONDO JULIO 2002 se obtuvo que su granulometría fue determinada por el laboratorio de ensayos de hidráulica de la Universidad Nacional en las numerosas muestras tomadas del material del lecho y en suspensión mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 7. Granulometría obtenida del L.E.H.U.N

Diámetro	% que pasa	Lecho	Suspensión
D min		0.063	0.063
D10		0.22	0.072
D25		0.29	0.09
D35		0.33	0.104
D50		0.41	0.124
D65		0.535	0.16
D75		0.65	0.181
D90		1.8	0.231
D100		6.3	0.4

De este mismo informe se extrajo otra granulometría media del lecho del río con base en los sondeos hechos por el buque explorador, operado por el laboratorio de ensayos de hidráulica de UN donde según las perforaciones ejecutadas las arenas gruesas y finas se encuentran hasta la cota 58 m.s.n.m . La granulometría media elegida por observación es la siguiente:

Tabla 8. Granulometría obtenida L.E.H.U.N

D (mm)	% pasa
3.15	100
2.5	99.7
2	99.5
1.5	99.4
1.25	99.1
1	98.4
0.8	96.7
0.63	91.4
0.5	75
0.4	54.6
0.315	28
0.25	14.4
0.206	10

Del informe análisis de las condiciones de navegabilidad del río magdalena elaborado por la unión temporal Consultores civiles e hidráulicos Ltda.. Silvia Carreño y asociados S.A. para la corporación autónoma regional del río grande de la magdalena (CORMAGDALENA). Se extrajo la siguiente información:

Tabla 9. Granulometría media

	Puerto Berrío	Barrancabermeja
D50 fondo	0.9 mm	0.4 mm
D50 arrastre	2.0 mm	0.4 mm
D50 saltación	0.16 mm	0.15 mm

La Universidad Industrial de Santander realizó para la empresa Disconsultoria un ensayo granulométrico al material del lecho del río en el sector de Barrancabermeja, cuya curva granulométrica es mostrada en la figura 13 junto con las anteriores granulometrías extraídas de los anteriores informes

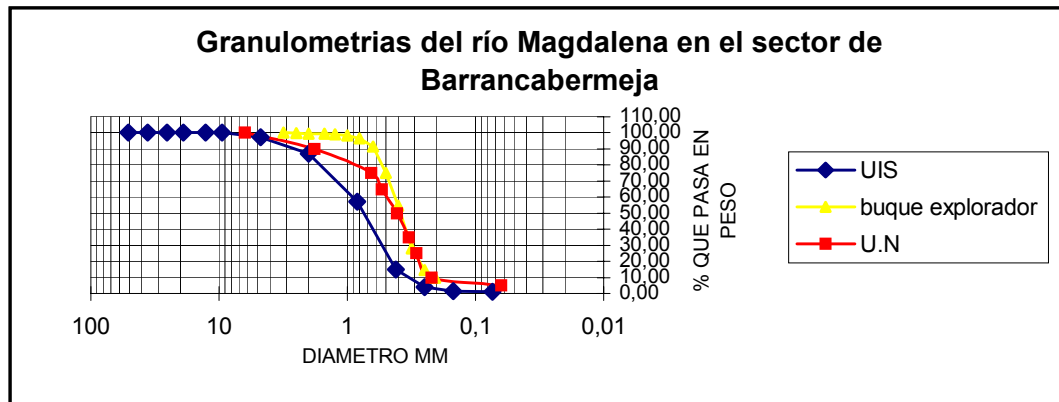


Figura 13. Curvas granulométricas del sector de Barrancabermeja.

En base a la figura 13. la cual muestra todas las granulometrías recolectadas podemos determinar un rango para el diámetro medio del material del lecho necesario para el cálculo de las profundidades de socavación, el cual varía desde 0.4 mm hasta 0.7mm. definiéndose como arena media fina.

4.7.2 Peso unitario

Se recolectó una serie de sondeos realizados en el informe final presentado por el CONSORCIO DESARROLLO DE VIAS en el estudio de suelos y cimentaciones puente Barrancabermeja-Yondo (Santander –Antioquia). A estos sondeos consignados en el anexo se le sacaron el promedio y los resultados fueron los siguientes:

Arena fina a media: 1.63 ton/m³.

Arena media a gruesa: 1.793 ton/m³.

En ese mismo informe se encontraron los valores de pesos unitarios utilizados para el calculo de las cimentaciones, presentados en la siguiente tabla:

Tabla 10. Pesos Unitarios

MATERIAL	PESOS UNITARIOS (ton/m³)
Arena suelta	1.75
Arena densa	1.75
conglomerado	2.0

4.7.3 Factor de rugosidad

Se seleccionó de los informes consultados un valor de 0.03 del factor de rugosidad del material del fondo del río de la ecuación de Manning utilizada para determinar la velocidad del canal en los perfiles batimétricos.

Del informe #1 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL RIO MAGDALENA FRENTE A LA ESTACION GALAN Y PLANTA DE PROPANO, ELABORADO POR LA EMPRESA DE INGENIERIA DE SUELOS LTDA INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE DESLIZAMIENTOS Y EROSION PARA ECOPETROL, 1997 se obtuvo que de aforos realizados dentro del tramo en estudio el factor de rugosidad de la formula de Manning era del orden de 0.03.

Del estudio del modelo hidráulico de fondo móvil, elaborado por la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) para la empresa industrial y comercial del estado CORMAGDALENA (corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena), marzo de 2003 se notó que los parámetros utilizados para la realización del modelo a escala del río Magdalena sector Barrancabermeja coinciden con los calculados a partir de los perfiles batimétricos excepto la velocidad la cual varia según los niveles de agua y anchos del canal los cuales son muy variantes en el sector debido a su carácter trezado señalado en el capítulo 4.

Velocidad: 1.31 m/s.

Número de Froude: 0.18

N de manning : 0.031

Pendiente: 0.00015

En el informe de HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN, ESTUDIO Y DISEÑOS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO MAGDALENA EN LA CARRETERA BARRANCABERMEJA –YONDO JULIO 2002 por medio de aforos y de batimetrías necesarios para el programa Transed se determinó los coeficientes de rugosidad de Manning del lecho teniéndose para la condición del flujo referente un valor de 0.032.

4.8 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

(Hidrotec 1986 y 1987) En cuanto a transporte de sedimentos en suspensión y de fondo se tienen los siguientes valores medios anuales:

Tabla 11. Carga de sedimentos

Sitio	Carga en suspensión (Ton/año)	Carga de Fondo (Ton/año)
Barrancabermeja	71.300.000	8.900.000
San Pablo	98.600.000	12.300.000

De acuerdo a los resultados de aforos sólidos en diciembre de 1988, en condición de aguas altas, el transporte total de arenas por el brazo izquierdo frente a Barrancabermeja era de 370.000 toneladas diarias, mientras por el brazo derecho era de 120.000 toneladas. (BEX-Hidroestudios 1987 y 1989), par un total de 490.000 toneladas diarias, valor muy superior al promedio diario obtenido de los valores presentados por Hidrotec.

Según estudios Técnicos S.A. , en el momento de realizar trabajos batimétricos (13 a 15 de enero de 1997), los niveles del agua son excedidos en un 30% del tiempo(estado de niveles medio alto), encontrándose un nivel del río Magdalena en Barrancabermeja promedio de 72.84 msnm, para el cual el caudal liquido es de 2.720 m³/s y un caudal sólido del orden de 95.000 Ton/d.

4.9 SEDIMENTACIÓN

La sedimentación ha sido estudiada a detalle para el Muelle de Barrancabermeja en relación con los programas de dragado.

En las mediciones efectuadas en el muelle Publico de Barrancabermeja, en el periodo comprendido entre agosto de 1986 y enero de 1989 se registro un volumen de sedimentos depositados de 160.000 m³. (BEX-Hidroestudios 1987 y 1989) En periodos de aguas altas, el volumen promedio de sedimentación registrado ascendió a 175 m³/dia.

Los valores de sedimentación registrados en el área de Barrancabermeja en octubre de 1993 variaban entre una rata de 175m³/dia medida como un promedio de un periodo de aguas altas en el muelle publico, a una sedimentación de 2.200m³/dia, lo que indica la influencia que puede tener un fenómeno puntual, como una creciente en los fenómenos de sedimentación en el área de Barrancabermeja. (Hidrotec S.A. 1993).

Los procesos de sedimentación aguas arriba en el sector del muelle publico son bien conocidos por los anuales problemas de navegación que presenta el sector para la entrada y salida de embarcaciones. La sedimentación en este sitio se ve agravada debido a los aportes de sedimentos del caño Cardales y en especial a que la vaguada del Río en ese sitio discurre por la margen izquierda.

Entre agosto de 1986 y enero de 1989 en las mediciones de sedimentación efectuadas en el muelle Publico de Barrancabermeja, se registro un volumen de sedimentos depositados de 16.000 m³ en periodos de aguas altas y el volumen promedio de sedimentación registrado ascendió a 175 m³/d. (Hidroestudios S.A. 1993). La variación volumétrica dela sección dragada muestra erosiones variables entre 900 y 200 m³/d, y una sedimentación máxima del orden de 2.200 m³/d, ocasionada por una creciente que se presento durante el desarrollo de las mediciones, la cual equivalía a una sobreelevación del fondo, en el área investigada, de 9 centímetros. Es de anotar que durante el periodo en el que se desarrollaron las mediciones de

control, se estimo que el caudal sólido por el canal dragado ascendía a 2850m³/d. Con base en lo anterior, se calculo que la gama de valores para el proceso de sedimentación en el canal dragado oscilaría entre 215m³/d Y 430m³/d durante los días de monitoreo.

Comprando los fondos de las Batimetrías del año 1997 con las de los años 1994 y 1991 y calculando los volúmenes de dragado estimados, se presenta una tabla comparativa delas zonas de erosión y sedimentación delos años 1997 y 1994 (Hidroestudios S.A. 1997).

Tabla 12. Erosión y sedimentación

Periodo(año)	Erosión (m3)	Sedimentación (m3)
1997-1994	992971	327713
1997-1993	863349	306236
1997-1991	1.16532E+11	447749

Los volúmenes anteriores corresponden a las áreas comunes de las Batimetrías comparadas.

4.10 ESTUDIO HIDROLOGICO

La hidrología del río Magdalena en Barrancabermeja depende del régimen de lluvias en las cuencas alta y media y no necesariamente del régimen de lluvias local. Sin embargo con el objeto de tener una concepción clara de los problemas de la orilla del río, se analizó la información disponible de lluvias en el sector de Barrancabermeja. La precipitación media anual en la zona de Barrancabermeja Y Casabe era del orden de 2.300 mm, siendo octubre el mes más lluvioso y enero el más seco. La hidrología del río Magdalena,

depende del régimen de lluvias en las cuencas alta y media, y no necesariamente del régimen de lluvias local, ver tabla 13. Sin embargo, para tener una concepción clara de los problemas de la orilla del río, se analizó la información disponible de lluvias en la zona de Barrancabermeja. La información recopilada de precipitaciones se obtuvo en el IDEAM Bucaramanga, para las siguientes estaciones: Yondó, aeropuerto Yariguíes, Puerto Wilches, El Centro, puente Ferrocarril, Chucurí, La Coquera, Yanace y Peñas Blancas, ver tabla 14.

Tabla 13. Precipitaciones mensuales

Localidad	Años	Precipitación mensual (mm)		
		Máximos mensuales precipitación / año	Medios mensuales	Mínimos mensuales precipitación/ año
Yondó	1. 974 - 1. 996	935,0 / 95	400,6	0/90
Yariguíes	1. 931 - 1. 996	1.190 / 38	397,2	0 / 45
pto Wilches	1. 958 - 1. 996	837,0 / 73	378,7	0 / 64
El Centro	1. 937 - 1. 996	1. 072 / 42	407,5	0 / 49
Ferrocarril	1. 981 - 1. 996	647,0 / 94	390,2	2 / 88
Chucurí	1. 959 - 1. 995	1.075 / 62	450,9	0 / 79
La Coquera	1.974 - 1. 995	717,0 / 79	432,9	0 / 75
Yanacue	1. 974 - 1. 991	1.187 / 84	479,3	0 / 75

Tabla 14. Estaciones para análisis de lluvias

No.	Código	Nombre	Elevación	Coordenadas	Años
1	2316001	Yondó	140	6° 58 N 73° 56 E	1974-1996
2	2315503	Apto. Yarigués	126	7° 1N 73° 48 E	1931-1996
3	2318002	Puerto Wilches	128	7° 21 N 73° 54 E	1958-1996
4	2315504	El Centro	162	6° 52 N 73° 46 E	1937-1996
5	2314004	Pte Ferrocarril (Opón)	95	6° 50 N 73° 50 E	1981-1996
6	2313001	Chucurí	100	6° 56 N 74° 02 E	159-1995
7	2318012	La coquera	170	7° 14 N 73° 55 E	1974-1995
8	2317003	Yanacué	162	7° 18 N 74° E	1974-1991
9	2316701	Peñas Blancas	80	6° 57 N 73° 57E	1977-1995

4.11 Estudio hidráulico.

El río Magdalena en Barrancabermeja poseía en 1.986, un caudal medio de unos 3200 m³/s, mientras en la zona Cantagallo - Puerto Wilches aumentaba

a unos 3.450 m³/s, debido principalmente a la confluencia del río Sogamoso.

La información de caudales fue analizada para las estaciones de Maldonado, Peñas Blancas con base en los datos de caudales del IDEAM y se obtienen valores de caudal considerablemente superiores.

Tabla 15. Caudales medidos del río

Localidad	Años	Caudales (m ³ /s)		
		Máximo Caudal/año	Medios	Mínimos Caudal/año
Maldonado	1979-1996	7203 / 82	4642	709 / 92
Peñas Blancas	1977-1995	5574 / 84	3748	1019 / 79

Desde otro punto de análisis, los caudales de creciente estimados se muestran en la Tabla 16:

Tabla 16. Caudales estimados de crecientes

Sitio	Periodo de Retorno (Caudales en m ³ /seg)				
	2	10	20	50	100
Casabe	7000	8846	9550	10470	11150
Cantagallo	7580	9580	10340	11330	12070

De los aforos realizados se dedujeron que dentro del tramo en estudio el factor rugosidad de la fórmula de Manning era del orden de 0,030, mientras que la pendiente hidráulica tomaba valores que oscilaban entre SF=0,00025 hasta SF=0,00040, variando en función directa al caudal.

Los niveles de agua del río Magdalena fueron analizados de acuerdo a la estación limnimétrica de Barrancabermeja a entre 1.920 Y 1.997, de esta curva se desprende que el nivel máximo es de 75,5 metros y el nivel mínimo de 70,6 metros. Los meses de niveles máximos corresponden a las épocas de marzo a mayo y de octubre a noviembre; y las mínimas a los meses de enero a marzo. El nivel medio histórico es de 72,8 metros. La información disponible de niveles recolectada por el IDEAM para las estaciones de Maldonado y Barrancabermeja, se muestra en la Cuadro 14:

Tabla 17. Niveles del río Magdalena

Localidad	Años	Niveles (cm) No se conoce la elevación		
		Máximos	Medios	Mínimos
Maldonado	1979-1996	639 / 84	547	174 / 80
Barrancabermeja	1979-1995	1101 / 87	427	140 / 87

El análisis de la anterior información muestra que el rango de velocidades medias en la orilla del río Magdalena en el sector de Barrancabermeja varia generalmente de 1,5 a 3,0 metros por segundo con un promedio de 2,66 metros por segundo y la velocidad máxima medida es de 6,8 metros por segundo. Las velocidades máximas ocurren en los sitios de control geológico o artificial, tales como espigones y pantallas direccionales. En estas condiciones la amenaza de erosión lateral no es muy grande a menos que la corriente máxima se acerque a la orilla. Se tiene que las velocidades críticas de erosión son de 1,62 metros por segundo para los limos, de menos de un metro por segundo para las arenas y de 1,30 metros por segundo para las turbas. Se calculó una pendiente hidráulica para el sector de Barrancabermeja en 25 centímetros por kilómetro, ver tabla 18.

Tabla 18. Estación Galán, código 315705, km 628,70.

Fecha	Q m³/seg	V m / seg
31-VIII-1.974	1.784	1,13
24-IX-1.974	5.176	1,53
25-X-1.974	4.178	1,47
25-XI-1.974	6.017	1,61
18-II-1.975	1.655	1,23
23-III-1.975	2.712	1,37
12-V-1.975	5.033	1,81
28-VI-1.975	3.598	1,35
24-VIII-1.975	2.842	1,22
24-IX-1.975	5.789	1,89
24-X-1.975	4.206	1,48
26-XI-1.975	0.432	1,89
26-I-1.976	2.172	1,37

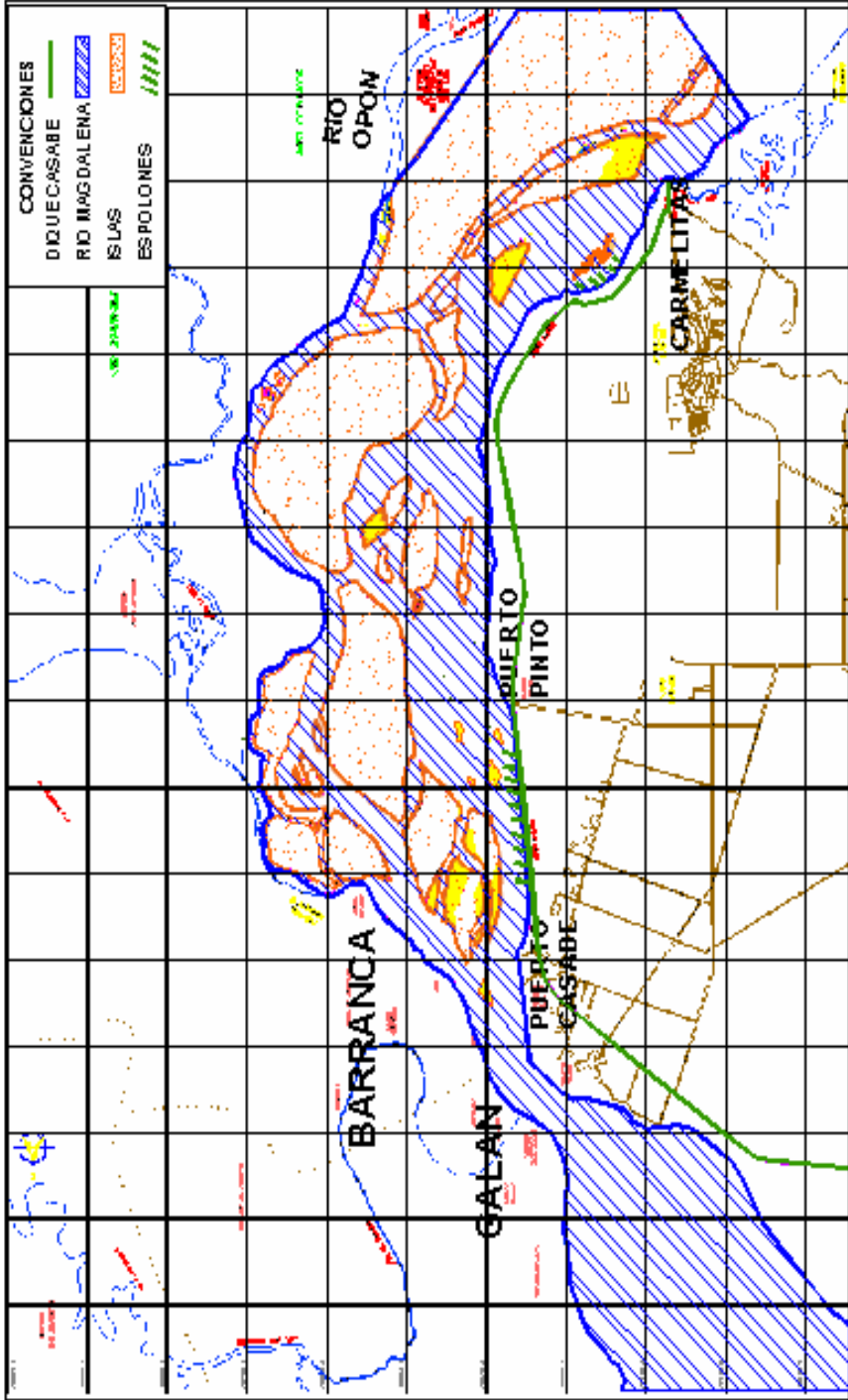
5 INFORMACIÓN DETALLADA DE LAS OBRAS REALIZADAS

La información se obtuvo a partir del informe de consultoría técnica realizada por HIDROTEC en el año 1986, este informe coincide con las obras realizadas que se muestran en los planos base de nuestro análisis suministrados por la empresa GEOTECNOLOGIA.

En este informe se muestran los criterios que tuvieron en cuenta para el diseño de los espolones. Teniendo en cuenta la morfología de la zona y su dinámica fluvial de ese momento.



Figura 14. Espolones puerto Pinto-puerto Casabe.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

UBIICACION GENERAL

BASE PLANIMETRICA TERRESTRE 1986

FIGURA15 SIN ESCALA

5.1 DISEÑO

La zona de estudio se divide en los siguientes sectores:

- Sector Carmelitas: En este tramo del río dentro del cauce principal se nota una tendencia a formar curvatura, favorecido por la existencia de "Puntos duros" como Puerto Carmelitas que actúan como grandes espolones orientando localmente el flujo; es así que se tienen dos zonas de fuerte ataque erosivo: una inmediatamente aguas arriba de Puerto Carmelitas, que podría inestabilizar el Puerto y otra al final de la llamada Bahía Carmelitas donde el río está muy cerca del dique marginal. Los Consultores creían que era necesario restituir la curvatura de la orilla en estos sitios y para cada uno de ellos se presentaron los diseños detallados de obras transversales (espolones) de corta longitud para que su efecto fuera solo el deseado sin modificar sustancialmente el comportamiento del cauce y alterar la dinámica fluvial.

Tabla 19. Sector: aguas arriba de Punta Carmelitas

No. de espolones	Longitud
1	15
2	20
3	30
4	25
5	15

Con cota en la corona de 75.6 m.s.n.m

Tabla 20. Sector: Bahía Carmelitas

No. de espolones	Longitud
6	10
7	15
8	20
9	30
10	40
11	20
12	10
13	10

Con cota en la corona de 76.5 m.s.n.m

- Sector Puerto Pinto –Puerto Casabe: Se encontró que presentaba dos zonas donde era necesario restituir la orilla con espolones, debido al ataque frontal de la corriente principal del río; estos sitios fueron determinados como Puerto Pinto y su zona aledaña hacia aguas abajo, donde el dique marginal estaba en inminente peligro y la zona aguas arriba de Puerto Casabe en donde si se dejaba progresar el avance de la orilla se podía perder las facilidades del puerto. Se usaron al máximo los espolones existentes en la zona, los cuales aconsejaron ser rellenados con hexápodos para entrar a formar parte del cuerpo de los nuevos espolones.

Sector: Puerto Pinto-Puerto Casabe

Tabla 21. Aguas debajo de Puerto pinto

No. de Espolones	Longitud
1	10
2	15
3	25
4	30
5	35
6	40
7	15
8	20
9	35
10	35
11	8
12	25

con cota en la corona de 76 m.s.n.m

Tabla 22. Aguas arriba de Puerto Pinto

No. de Espolones	Longitud
13	25
14	45
15	50
16	20
17	10

con nivel de corona de 75 m.s.n.m

En el diseño consideraron los siguientes puntos importantes como la longitud, orientación y separación entre espolones, así como también se tuvo en cuenta los siguientes criterios de diseño:

- Pendiente y cota de la corona: En el proyecto se diseñaron obras con corona inclinada hacia el cauce. Para esta última se optaron valores de $s = 0.2$ o sea el 20% de pendiente longitudinal; en lo posible el extremo del espolón dentro del cauce no debe tener una altura mayor de 1.00 metro sobre el fondo actual.
La cota de la cresta se tomó la decisión de que debía ser semejante a las cotas del terreno en las orillas.
- Sección transversal: Los espolones a base de hexápodos se tomó una sección transversal de 1.5 metros de ancho de corona y taludes 1.5H: 1V.
- Materiales de construcción: Se determinó que lo más apropiado era usar hexápodos en la construcción de los espolones. Para determinar su peso mínimo se hizo uso de la fórmula de Isbash:

$$W = 0.0219 * \frac{V^6}{g^3} * \gamma_s * \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^3 * \left(\frac{1 - \text{sen}^2 \alpha}{\text{sen}^2 \phi} \right)^{-3/2}$$

Donde: W = Peso mínimo en lb.

V = Velocidad actuante en pies /seg.

γ_s = Peso unitario del material

γ_w = Peso unitario del agua

α = talud de la protección en grados

φ = ángulo de fricción del material

g = gravedad

El tamaño de hexápodo escogido tiene una altura de 0.9 metros conformado por un cubo central de 0.3 x 0.3 x 0.3 m y 6 troncos de pirámide de base mayor 0,3 x 0,3m y base menor 0.2 x 0.2 m con 0.3 metros de altura para un volumen de aproximadamente 0.14 m³ y un peso de cerca de 370 Kg. Si se asume un $\varphi = 40^\circ$ y se tiene $\alpha = 33,70$ este hexápodo es capaz de resistir velocidades actuantes del orden de 4.0 m/s, valor que se consideró suficiente para las condiciones en que fue colocado en Casabe.



Figura 16. Hexápodo tipo Casabe

5.2 METODO CONSTRUCTIVO

En un sitio por fuera de las instalaciones de ECOPETROL pero junto al río se procedió a armar la formaleta y fundir el concreto para los hexápodos previo figurado y colocado del refuerzo engrase de la formaleta dosificación

de la mezcla, paralelamente se realizó el cocido de los rollos de geotextil para formar las mantas de protección.

Con una grúa se procedió a transportar los hexápodos a un planchon con remolcador y la manta debidamente enrollada en un segundo planchón; una vez estuvo localizado el sitio de colocación de la protección utilizando equipos de topografía, uno de los remolcadores colocó la manta a la cual se le colocó inicialmente unos pesos para que la punta del rollo se hundiera fácilmente; a medida que se fue extendiendo la manta en el río, la grúa en el segundo planchón iba colocando los hexápodos sobre la manta, bajándolos individualmente con una altura máxima de un metro con respecto al fondo del río. En las áreas de traslapo los hexápodos solamente se colocaron después de haber colocado la segunda manta, siguiendo un procedimiento similar al indicado.

Después de terminado el proceso de colocación de la manta de geotextil y los hexápodos repartidos, se procedió a la colocación de los hexápodos de las barreras retardadoras y los rompeolas.

6 RELACION DE PLANOS

Se escogieron los planos más representativos para someterlos bajo análisis, de los cuales el plano número 8 tuvo que ser descartado debido a las incongruencias en las cotas batimétricas entre un tramo y otro, lo cual se notó después de haberse realizado una primera selección de los planos.

Tabla 23. Relación de planos

No. DE PLANO	NOMBRE DEL PLANO	PLANO	ESCALA	FECHA	ENTIDAD
1	Batimetría Sector Puerto Pinto – Puerto Casabe	1 de 2	1: 2000	Sep-90	ECOPETROL distrito de producción El centro
2	Batimetría y localización de borde Río Sector Puerto Casabe	1 de 3	1: 2000	Dic-91	ECOPETROL distrito de producción El centro
3	Levantamiento planimétrico y batimétrico del Río Magdalena Sector Puerto Carmelitas y Curva de Areneros	2 de 2	1: 2000	May-93	ECOPETROL distrito de producción El centro

No. DE PLANO	NOMBRE DEL PLANO	PLANO	ESCALA	FECHA	ENTIDAD
4	Batimetrías Puerto Pinto- Puerto Casabe Levantamiento planimétrico y batimétrico del río Magdalena Sector Puerto Pinto Y puerto Casabe	2 de 3	1: 2000	May-93	ECOPETROL distrito de producción El centro
5	Batimetrías Puerto Carmelitas Batimetrías Río Magdalena sector Puerto Carmelitas	único	1:1000	Nov-93	ECOPETROL distrito de producción El centro
6	Batimetrías Puerto Carmelitas levantamiento planimétrico y batimétrico del río Magdalena Sector Puerto Carmelitas	2 de 2	1:2000	Nov-93	ECOPETROL distrito de producción El centro

No. DE PLANO	NOMBRE DEL PLANO	PLANO	ESCALA	FECHA	ENTIDAD
7	levantamiento planimétrico y batimétrico del río Magdalena Sector Puerto Carmelitas a Puerto Pinto	2 de 2	1:2000	Dic-94	ECOPETROL distrito de producción El centro
8	levantamiento planimétrico y batimétrico del río Magdalena sector Puerto Carmelitas a Puerto Pinto	1 de 2	1:2000	Oct-95	ECOPETROL distrito de producción El centro
9	Levantamiento planimétrico y batimétrico del río Magdalena Sector Puerto Casabe y Campo Galán	1 de 2	1:2000	Oct-95	ECOPETROL distrito de producción El centro
10	levantamiento planimétrico y batimétrico del río Magdalena Sector Puerto Carmelitas	4 de 4	1:2000	Jun-96	ECOPETROL distrito de producción El centro

De los anteriores planos se tiene información planimétrica de cada uno de los espolones con sus respectivas coordenadas, longitudes, ángulos de orientación al flujo medidos respecto de la orilla, ancho del canal y separación entre ellos (ver anexo), estas medidas son diferentes en cada uno de los planos debido a la continua reparación realizada a estas obras ocasionada por el continuo hundimiento producido por la socavación. Estas reparaciones varían de acuerdo a las condiciones del río en ese momento cambiando su longitud, separación, espaciamiento, y ángulo con respecto a la orilla.

Se elaboraron los perfiles de cada una de las secciones transversales de cada espolón a partir de los planos batimétricos suministrados por la empresa GEOTECNOLOGIA con sus respectivos niveles de agua calculados a partir de interpolaciones cuyas pendientes se obtuvieron del promedio de los niveles medios diarios en las estaciones limnimétricas del IDEAM Barrancabermeja y Maldonado. (ver anexo)

7 ANALISIS

7.1 ANALISIS DE LAS ECUACIONES

En la investigación se encontraron 18 formulaciones para el cálculo de los niveles de socavación en la punta de un espolón, la mayoría de estas expresiones son ajustes realizados a partir de fórmulas para el cálculo de la socavación de pilas y estribos de puentes, de estas se extrajeron 12 ecuaciones pues, aunque el estudio de su socavación se puede hacer claramente en los planos batimétricos, la falta de datos como medidas de concentración de sedimentos en suspensión no permitía aplicar las 6 restantes.

La ausencia de datos se debe a que la estación del IDEAM Peñas Blancas no tenía los registros de los datos de tasa de transporte de sedimentos en los meses requeridos para el estudio. Sin embargo la estación Maldonado, si registró la mayoría de estos datos, pero debido a que el río Magdalena en el tramo de estudio muestra una gran complejidad no son suficientes para la estimación de la concentración de sedimentos. La complejidad del tramo se debe a la incapacidad transportadora del río para mantener en suspensión la gran cantidad de sedimentos que le aporta su hoya hidrográfica, que trae como consecuencia la formación de múltiples islas y playones dentro del cauce generando un patrón de drenaje trenzado, es decir con muchos canales donde es muy difícil determinar el valor cercano a la realidad de tasa de transporte, incluyendo el canal que contiene a los espolones; aunque existen ecuaciones como la de Du Boys para estimarla su aplicación no es recomendable debido a la complejidad antes mencionada, dejando como mejor opción la medición en el propio canal.

Las ecuaciones sometidas a análisis son las siguientes:

Tabla 24. Ecuaciones sometidas a análisis

No. de formula	Autor año	Ecuación	Rango de viabilidad
1	Koshla (1936)	$H' = \frac{h+z}{h} = \frac{0.9q^{2/3}}{hf_1^{1/3}} = const_3 \sqrt{\frac{Fr^2}{f_1}}$ <p>donde $q = Q/B$, f_1 – coeficiente de Lacey</p>	
2	Ahmad (1953)	$H' = k' \frac{q_1^{2/3}}{h}$	$0.2 \leq D \leq 0.7mm$ $h \geq 0.06m$
3	Altunin and Buzunov (1953)	$H' = k'_\alpha k'_m k'_n$	$30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $0 \leq m \leq 3$ $0.1 \leq n \leq 0.8$
4	Garde et al. (1961)	$H' = f_1(Cd) \frac{(Fr)^{f_2(Cd)}}{1-n}$	$B=0.61m; m=0$ $0.3 \leq D_{50} \leq 2.2mm$ $0.1 \leq Fr \leq 0.8$ $0.1 \leq n \leq 0.47$ $60 \leq t \leq 180min$
5	Gill (1972)	$H' 8.375 \frac{\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0.25}}{(1-n)^{0.857}}$ <p>$\tau = \tau_c$ $0 \leq Cs \leq 0.45kg/m^3$</p>	$B=0.76m; m=0;$ $0.9 \leq D \leq 1.5mm$ $2.6 \leq h \leq 10cm$ $0.2 \leq Fr \leq 0.8$ $D_{60}/D_{10} = 1.4$ $0.13 \leq n \leq 0.4$

No. de formula	Autor año	Ecuación	Rango de viabilidad
6	Das (1976)	$H' = 0.56 * 10^{(0.602n - 0.0294)} \left(\frac{h}{D}\right)^{0.29} Fr^{0.8}$	B=2.3m; $\alpha=90^\circ$ $0.1 \leq n \leq 0.9$ $5.5 \leq h \leq 11.6cm$ $0.25 \leq D \leq 1.6mm$ $0.05 \leq Fr \leq 0.6$ $50 \leq t \leq 230min$
7	Neill (1973,1980)	$H' = \frac{2.1 \div 2.75}{h} \left(\frac{2.5q^2}{D^{0.318}}\right)^{0.333}$	$0.1 \leq D_{50} \leq 200m$ h en m; D en mm; q en (m ² /s)
8	Buy Ngok (1981)	$H' = \frac{1.09 \exp[-0.075(m_s + 1)]}{(1-n)^{0.3}}$ $x \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{0.2} \left(\frac{h_g}{h}\right)^{0.41} f_1(Cd)(Fr)^{f_2(Cd)}$	B=0.75 y 1.0 m $0 \leq m_s \leq 3; m_g = 0$ $0.1 \leq n \leq 0.6$ $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $0.5 \leq h_g / h \leq 1$ $0.33 \leq D \leq 8.3mm$ $0.12 \leq Fr \leq 1.6$ t = 360min
9	Liu (1961)	$H = \frac{z}{h} = k_m \left(\frac{Lp}{h}\right)^{0.4} (Fr)^{0.33}$	B=1.2 y 2.4 m. D ₅₀ =0.6mm
10	Richardson (1975)	$H=4Fr^{0.33}$	Para Mississippi donde (Lp/h >25)

No. de formula	Autor año	Ecuación	Rango de viabilidad
11	Zaghloul (1983)	$H = \frac{2.62}{(180^\circ - \alpha)^{0.043}} \frac{(Fr)^{2/3}}{1 - n}$	$10 \leq h \leq 30\text{cm}$ $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $0.18 \leq Fr \leq 0.48$ $0.1 \leq n \leq 0.5$ $m = 0; D \geq 4.5\text{mm}$ $180 \leq t \leq 4320\text{m}$

Las ecuaciones que se sometieron a análisis son expresiones obtenidas a partir de modelos escala en tramos rectos excepto las expresiones desarrolladas por los siguientes autores: Koshla (1936), Neill (1973, 1980) y Richardson (1975). Estas ecuaciones han sido sometidas a comprobaciones en el río Warta demostrando que para determinadas condiciones la formulación con mayor ajuste a las socavaciones medidas es la realizada por Buy Ngok (1981), ya que esta tiene en cuenta factores como el nivel de sumergencia del espolón, ángulos de inclinación con respecto al flujo, talud del espolón y la relación de su longitud con el ancho del canal.

El análisis se basa en la comparación de los resultados obtenidos mediante las expresiones matemáticas con las medidas en los planos batimétricos del río Magdalena en los tramos Puerto Carmelitas -Puerto Pinto y Puerto Pinto-Puerto Casabe, considerando acertados aquellos niveles con un margen de error menor al 10%, ya que se pretende encontrar una expresión que permita predecir con buena certeza los niveles de socavación; buscando aportar a futuros estudios y diseños, conocimientos básicos que les permita replantear la cimentación de estas obras y así aumentar la vida útil de estas obras.

Las formulaciones que mejores aproximaciones obtuvieron fueron las desarrolladas por Neill y Das; que tienen como parámetros en común el diámetro medio del lecho y el nivel de agua; demostrando que estos factores son determinantes en la estimación de los niveles de socavación. La expresión matemática expuesta por Nelly acertó alrededor del 55% de las mediciones obtenidas en los planos seguida de la fórmula dada por Das con 38%. Las demás ecuaciones no se aproximan a la realidad con muy bajos porcentajes de pronóstico; a pesar del hecho de que en algunas incluían las mismas variables de predicción, la ventaja de la ecuación de Neill es que sus factores multiplicativos se ubican en un rango ampliando su posibilidad de predicción, sin estar limitada a estimar un solo nivel como lo hacen las otras. También la baja efectividad de predicción se debe a los rangos de validez presentados en la tabla 24 y como se expresó anteriormente estas formulaciones se dedujeron de modelos a escala; que excluyen factores de la dinámica fluvial que como se observó en el análisis de los planos intervienen significativamente en el proceso de socavación.

La importancia del diámetro medio del lecho evidenciado en las ecuaciones indica que la erosionabilidad o erodabilidad es un factor importante en la socavación, debido a que la iniciación del movimiento de una partícula de suelo se debe a la acción hidráulica que se define como el instante en el cual las fuerzas generadas por el fluido arrancan y levantan la partícula produciéndose su movimiento, excediéndose por lo tanto la fuerza estabilizante debida a la gravedad y las fuerzas de fricción y de cohesión. Los fenómenos de erosión son diferentes para los suelos granulares y para los suelos cohesivos; por ejemplo los suelos granulares (arenas y gravas) las fuerzas que resisten el movimiento son causadas principalmente por el peso propio de las partículas y los suelos finos (arcillosos) en cambio deben esta fuerza generalmente a la cohesión.

El nivel del agua también es relevante en la profundización del cauce, debido a que un aumento en el nivel del agua se traduce en mayor fuerza tractiva sobre las partículas del lecho que tratan de resistir esa fuerza de corte, como se observa en los anexos de las figuras del plano 5 en el cual la cota del nivel de agua 75.65 m.s.n.m que corresponde a uno de los mas altos niveles de agua registrados en la historia del Río Magdalena, ocasiona también la mayor socavación en el canal. Lo anterior permite establecer que a mayor nivel de agua mayor es la socavación o por el contrario a menor nivel de agua menor es la profundización como se distingue en el plano 1 donde la cota del nivel de agua es de 70.5 ms.n.m y su socavación debida a las estructuras es baja o casi nula.

La expresión desarrollada por Neill, demostró ser una de las ecuaciones con mejores acercamientos a las realidades, sin embargo esta ecuación podría mejorar si se le incluye a ella factores como nivel de sumergencia, inclinación del talud y ángulos con respecto a la orilla de estas estructuras. Los anteriores factores son muy importantes ya que determinan la forma en que las líneas de flujo chocan con la estructura del espolón; pues este es mas fuerte cuando el talud del espolón es vertical y su nivel de sumergencia es alto, aumentando de esta manera la turbulencia que produce la socavación.

A la socavación local que generaban los espolones se le sumo el efecto de la socavación por contracción del cauce, sin mejorar los resultados ya que como se observó la socavación local es mucho mayor que la de contracción, esto se da por las cortas longitudes de los espolones, que como establecieron los consultores de las obras construidas en la margen izquierda del río Magdalena, el fin de estas estructuras solo era proteger la orilla sin alterar la dinámica fluvial, ya que una contracción fuerte del cauce genera degradación del lecho en un extenso tramo del río alterando la morfología del río en la zona.

Es necesario aclarar que estas formulas son dadas para un solo espolón y no un grupo de ellos por lo que sus efectos no son tenidos en cuenta. Estos efectos suponen una disminución de la socavación a medida que se avanza en el grupo de espolones, sin embargo este patrón de comportamiento se observó en un solo plano (plano No. 6) y al aplicarle la fórmula dada por Suzuki (1987), no mejoró su nivel de acercamiento a la realidad, evidenciando que la socavación en los espolones se debe en gran parte a la localización en planta y a la forma en que varía el choque de las líneas de corriente principal con el grupo espolones.

Un alejamiento entre dos espolones causa la entrada del flujo hacia la orilla y una disminución de la profundidad de socavación ya que se reduce el esfuerzo cortante sobre el lecho como se observa en el plano 4 entre los espolones 18 y 9, 9 y 8; cuyas relaciones respectivamente de son 10.26 y 9.36 siendo unas de las relaciones más altas observadas en los planos. O por el contrario cuando están muy cerca con relaciones de separación / longitud (s/l) entre los rangos 1.55 y 8.4 muestran una acción conjunta superponiéndose los efectos actuando en conjunto como se presentó generalmente en todos los planos.

El tramo objeto de estudio está conformado por material granular fino en donde su comportamiento frente a la erosión depende principalmente de su tamaño y forma de sus partículas, y cuyo esfuerzo crítico es mucho menor que la fuerza tractiva que el agua ejerció sobre ellas en cada uno de los meses analizados, sin embargo desde el punto de vista de velocidad crítica del material definida por FHWA muestra una variabilidad en algunos meses demostrando la incapacidad del río para transportar el material de lecho, por lo que se genera las múltiples islas, playones y canales extensos o

estrechos. Los canales extensos crean disminución de las velocidades facilitando la sedimentación y los estrechos aumentan la velocidad facilitando la socavación; percibiéndose que los meses en que el río fue incapaz de transportar material las socavaciones fueron bajas y por otro lado cuando el río tenía capacidad para transportar material del fondo del río se presentaron altas socavaciones. (mirar tabla No.25)

Tabla 25. Niveles de socavación según el transporte de sedimentos.

No. plano	Niveles de socavación cuando el río no transporta material del lecho aguas arriba	Niveles de socavación cuando el río transporta material del lecho aguas arriba
1	No hay socavación local	
2	2.83 m.	
3	2 - 4.74 m	
4	0.35 – 2 m	
5		5 – 12 m.
6		1 – 7.75 m.
8	0.35– 2 m.	
9		4 m.
10	1	

En la anterior tabla se nota que para el plano 3 las socavaciones son profundas a pesar de la incapacidad del río para transportar material, debiéndose este hecho a que la localización de los espolones en este plano es en un tramo curvo razón por la cual se profundiza aún más los niveles de socavación comparados con tramos rectos.

7.2 ANALISIS POR PLANOS

De la información conseguida se escogieron los 10 planos referenciados en el capítulo 6, dentro de los cuales se apreciaba claramente varios efectos de la socavación producida por los espolones. En el **plano 1** no se presentaba una socavación significativa y esto se debe al bajo nivel de agua registrado.

En los **planos 8 y 10** no está completa la información de las curvas batimétricas, lo que impide un análisis completo del tramo.; sin embargo si se pudo calcular la socavación con las expresiones matemáticas en algunos espolones que si tenían información cercana a ellos.

7.2.1 Planos del tramo curvo

7.2.1.1 Análisis plano 3

En este tramo curvo se ubican 7 espolones que producen un cuenco con las siguientes características.

Area de extensión en planta: 12341.94 m²

Volumen total socavado: 23557.69 m³

Cota superior: 70

Cota inferior: 65.26

Altura: 4.74 m

El cuenco se forma aguas abajo del espolón 11, que no está actuando por que el flujo pasa cerca de él pero no lo ataca, pero después si se acerca a la orilla y ataca al espolón 12 ocasionando una leve socavación local pasando su punta; gracias a este espolón y al siguiente el 13, el thalweg se aparta un poco manteniendo una profundidad aproximada de metro y medio del cuenco

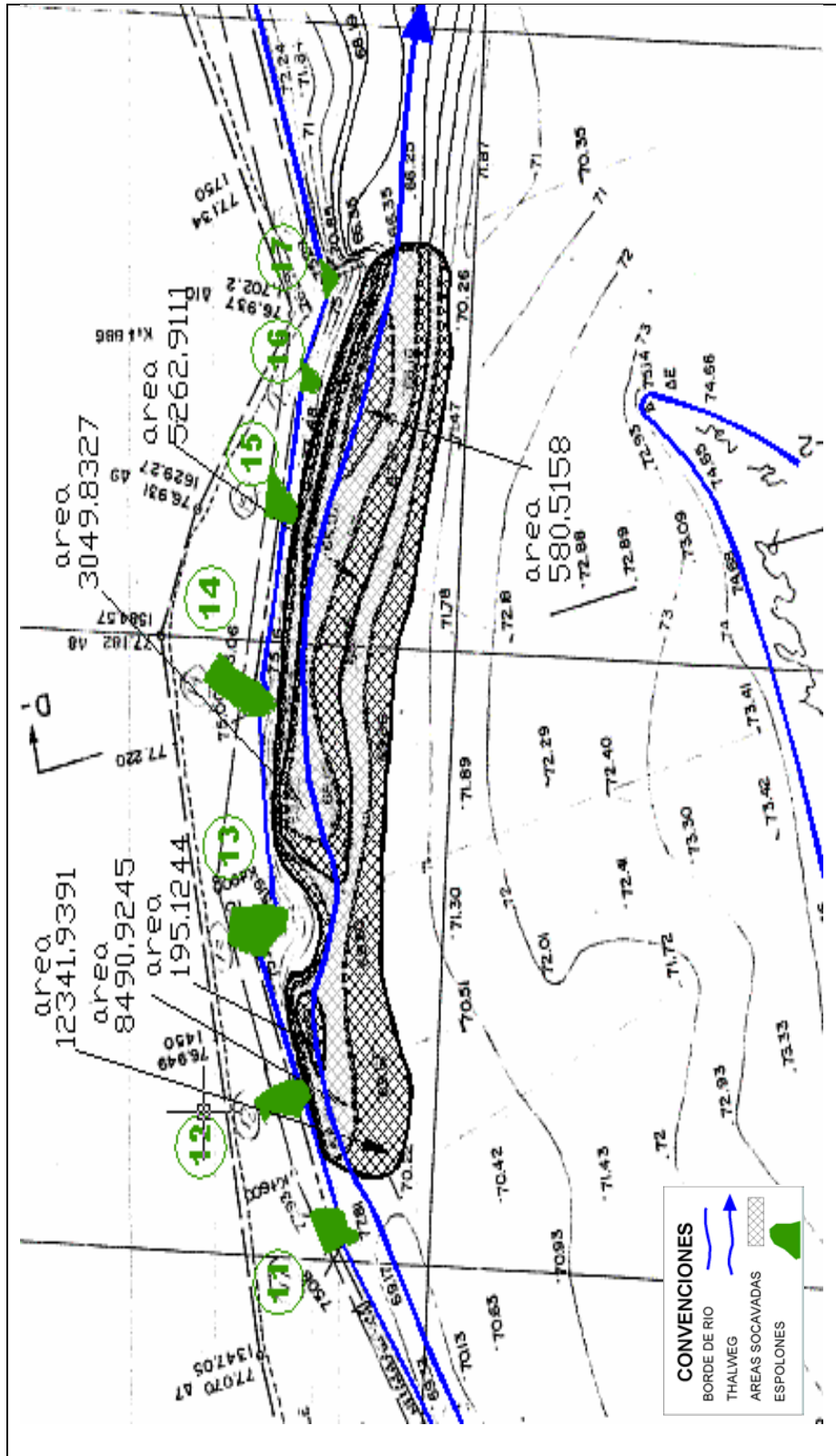


Figura 17. Plano 3



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BATIMETRIA DE PUERTO CARMELITAS- LEVANTAMIENTO PLANIMETRICO Y BATIMETRICO DEL RIO MAGDALENA- SECTOR PUERTO CARMELITAS Y CURVA DE ARENEROS

DE PLANO 3 AREAS DE SOCAVACION

FIGURA17 SIN ESCALA

FECHA MAYO-1993

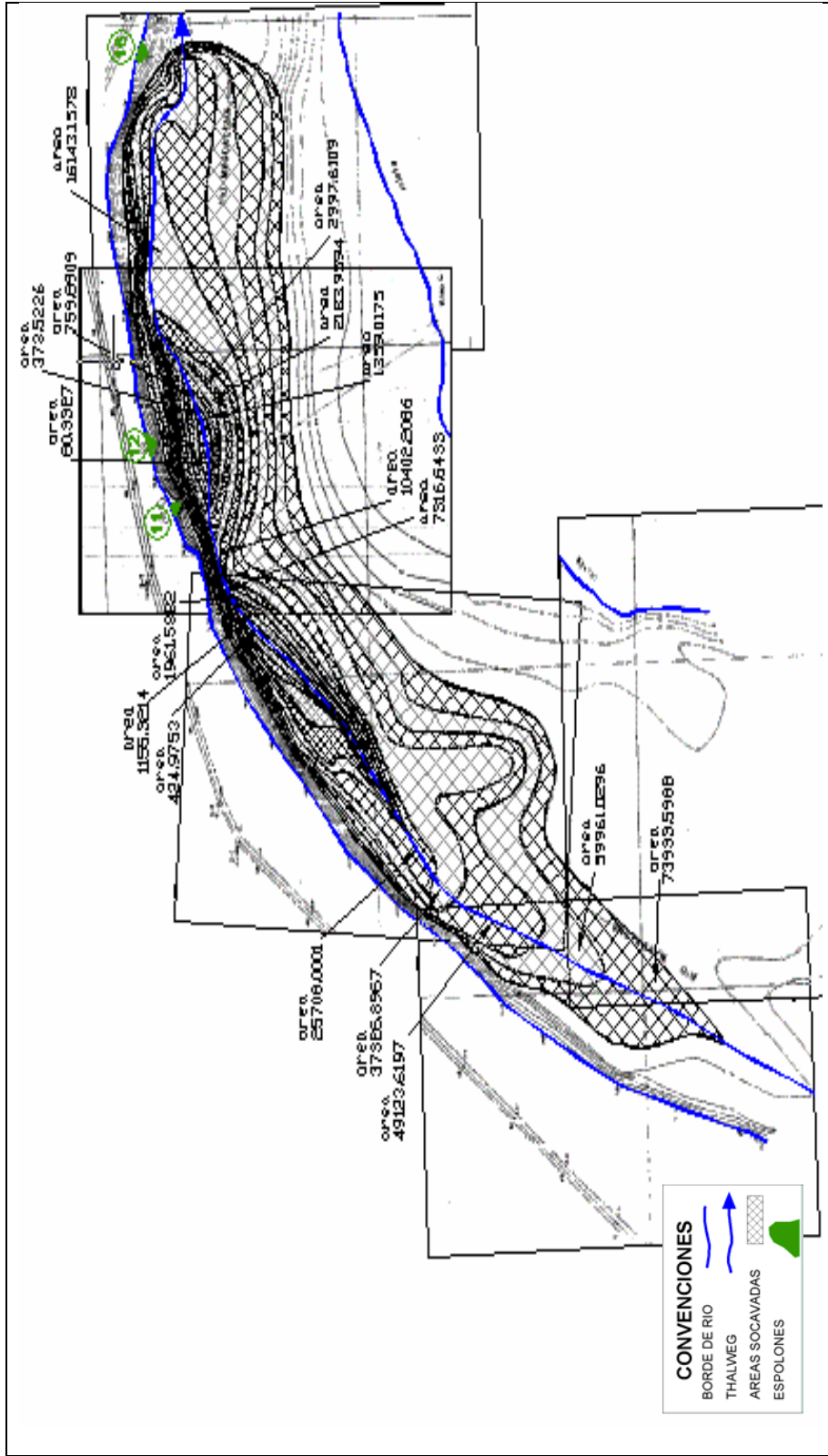
sin crear en este ultimo espolón socavación local pero si ayudando mas abajo de él a profundizar el cuenco en conjunto con los siguientes espolones. El siguiente espolón el 14 se encuentra un poco aparte y cerca de él se mantiene el cuenco entre 3 y 4 metros pero cuando el thalweg choca contra el 15, su efecto combinado con el de los espolones 16 y 17 aumenta la profundidad creando frente a ellos una fosa que alcanza la máxima profundidad de 4.74 m.

En este tramo después de la acción del grupo de espolones se ve que el río mantiene un canal más profundo cerca al borde saliendo de la curva y siguiendo por el tramo recto; esto muestra que aunque las curvas batimétricas 70, 69, 68 y 67 no se cierran después del ultimo espolón no se puede tomar de ahí en adelante ese canal como efecto de socavación de los espolones sino que es una profundización producida por la erosión que provoca el flujo que viene por el tramo recto, manteniendo un canal entre las cotas 66 y la 67 mas profundo que la cota del río (70) cerca de la orilla derecha.

7.2.1 .2 Análisis plano 5

En este tramo curvo se presenta un fenómeno interesante porque se encuentra una fosa donde no hay espolones y además se presenta la máxima profundidad de socavación, al mismo tiempo que se presenta el mayor nivel presentado en el río Magdalena con cota 75.65.

El thalweg va entrando a la curva y se encuentra con la orilla en un pico que trabaja como espolón por que se nota que ahí rebota el thalweg apartándose de la orilla, ese choque provoca, como en un espolón, remolinos que van socavando el fondo hasta formar una gran fosa; pero esta fosa no es tan



 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	BATIMETRIAS PUERTO CARMELITAS- BATIMETRIAS RIO MAGDALENA SECTOR PUERTO CARMELITAS	
	DE PLANO 5 AREAS DE SOCAVACION	
	FIGURA18 SIN ESCALA	FECHA NOVIEMBRE -1993

grande ni profunda como la que se forma cuando el thalweg pasa por los espolones 11 y 12 llegando hasta la cota 57.

Características del cuenco:

Área de extensión en planta: 73933.6m²

Volumen total socavado: 214287.45 m³

Cota superior: 70

Cota inferior: 57

Altura: 13m

Las dos fosas se conectan con un canal socavado estrecho con una profundidad entre 7 y 8 metros, y después de ellas la socavación toma dirección a la orilla, pero es controlada por el espolón # 16 que se encuentra solo pero bien ubicado(cumple bien su función). Después el río queda con cota entre 64 y 65 pero sigue el mismo canal que en el plano 3 por eso no se incluye como volumen socavado.

7.2.1 .3 Análisis plano 6

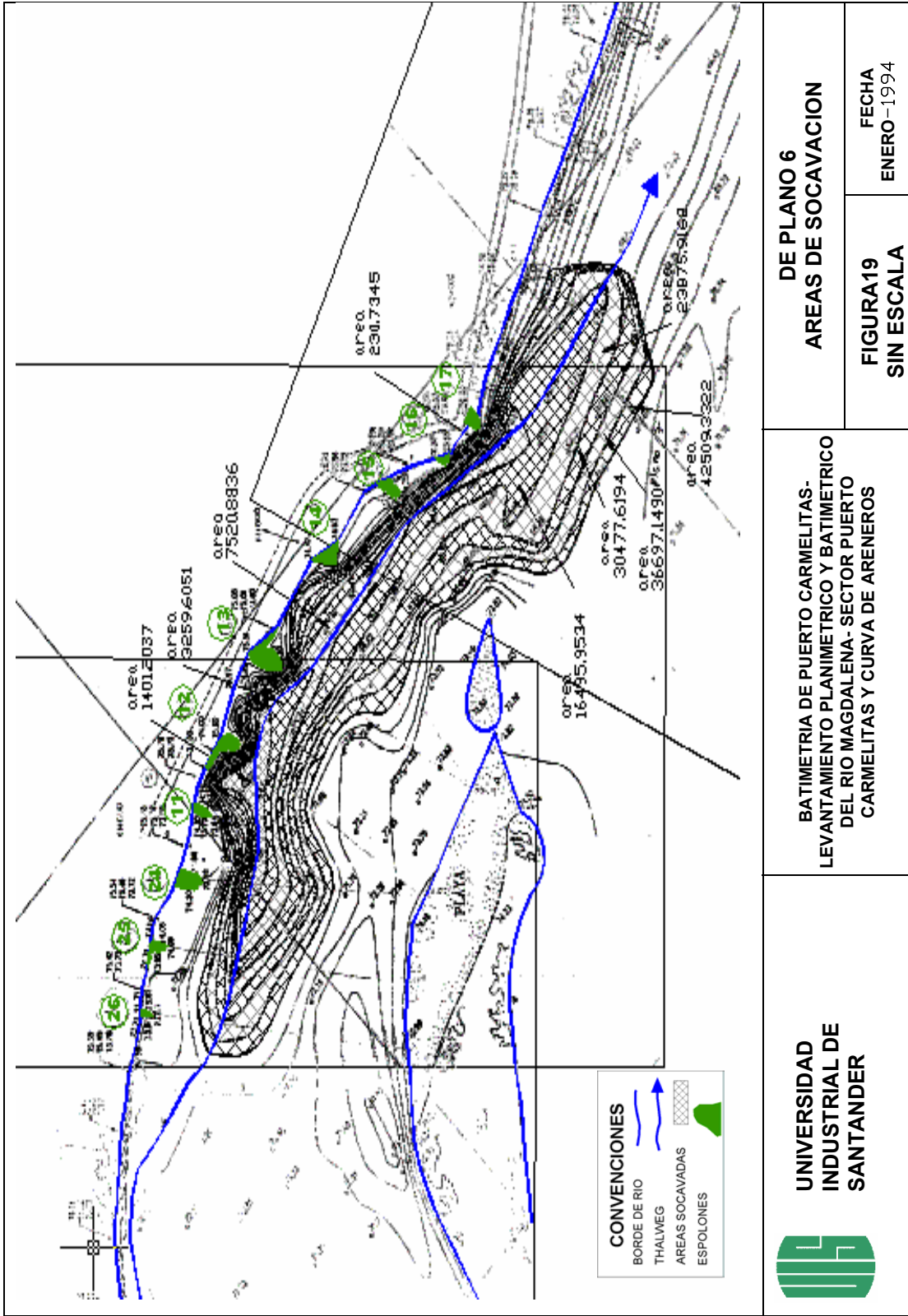
Es un tramo en curva donde se encuentra un grupo de 10 espolones donde solo 8 se ven involucrados en el efecto de socavación, ya que el cuenco esta un poco separado de los 2 primeros.

El cuenco que se presenta en este tramo tiene las siguientes características:

Área de extensión en planta: 42509.33 m²

Volumen total socavado: 140839.1 m³

Cota superior: 70



DE PLANO 6
AREAS DE SOCAVACION

FIGURA 19
SIN ESCALA

FECHA
ENERO - 1994

BATIMETRIA DE PUERTO CARMELITAS-
LEVANTAMIENTO PLANIMETRICO Y BATIMETRICO
DEL RIO MAGDALENA- SECTOR PUERTO
CARMELITAS Y CURVA DE ARENEROS


UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER

Cota inferior: 62.06

Altura: 7.94 m

En este tramo se puede apreciar claramente dos efectos de socavación, que son: una socavación con un área grande y alargada en dirección del thalweg como consecuencia de la acción del grupo de espolones y ayudada por el efecto de choque de la curva. Y otro efecto local del choque directo del flujo con algunos espolones que crea 2 fosas que están incluidas en la gran socavación antes mencionada. La primer fosa presenta la mayor profundidad ya que es el punto donde el thalweg choca directamente con 4 espolones que se encuentran cercanos entre sí, los 24, 11, 12 y 13 los cuales suman sus efectos de socavación de punta local creando la fosa. La poca separación entre ellos se nota indispensable pues la forma de las curvas batimétricas en el río muestra como la socavación entra hasta cerca de la orilla entre los espolones pero no logra erosionarla por que encuentra el siguiente espolón controla dicho efecto y lo separa nuevamente. Lo claro de esto es que este ataque se presenta por la curvatura del borde lo que demuestra que en los tramos curvos es necesario una menor separación entre espolones, aumentando así el número de espolones requeridos en el área a comparación con un tramo recto por proteger.

La segunda fosa se crea cuando el flujo nuevamente se acerca al borde y se encuentra con los espolones 16 y 17, en un choque no tan directo generando por lo tanto una fosa leve y alargada hacia la salida del thalweg de la curva. Después en el río se presenta el mismo canal mencionado en el plano 3, con cota entre la 66 y 67.

7.2.2 Planos del tramo recto

7.2.2 .1 Análisis plano 4

Es un tramo recto del río, en el cual se ubican varios espolones pero que los cercanos a las dos zonas de socavación producidas son 7, 3 en cada zona y uno entre las dos.

Siguiendo la dirección del flujo encontramos que los cuencos de socavación tienen las siguientes características:

PRIMER CUENCO

Área de extensión en planta: 22062.05 m²

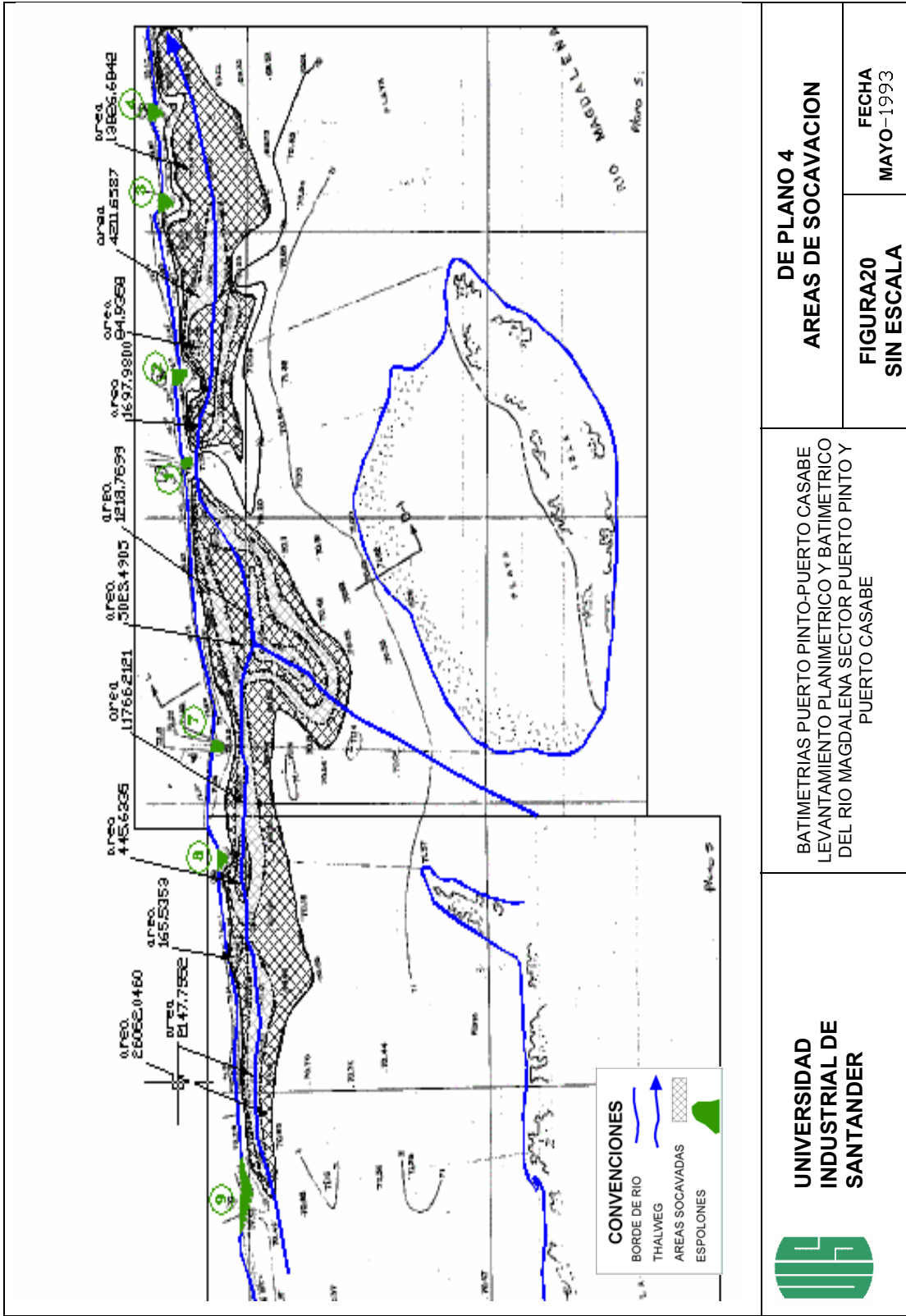
Volumen total socavado: 32693.31 m³

Cota superior: 70

Cota inferior: 66.33

Altura: 3.67 m

Teniendo en cuenta que la parte en punta de las curvas batimétricas determinan el paso del thalweg, la forma en L de este cuenco hace notar el encuentro de dos flujos, un flujo secundario procedente entre las dos islas y otro que va por la orilla. En el área de choque de los dos flujos se produce turbulencia y corrientes secundarias ocasionando la mayor profundidad de socavación en este cuenco. El flujo secundario no es muy fuerte, pero si le colabora con la socavación que llevaba en proceso y lo desvía un poco hacia la orilla, parando su efecto justo antes de encontrarse con el espolón 1, que logra deflectar el flujo separándolo de la orilla.



El flujo principal, que esta cerca de la orilla del río produce una socavación inmediatamente después del espolón 9,comenzando no tan profunda y que se va alargando y acercándose a la orilla, evidenciando que la separación con el siguiente espolón, es grande. Este espolón es el 8 y logra deflectar el flujo separándolo tanto de la orilla que no le permite atacar al espolón 7 quedando en este caso innecesario en su ubicación. Como el flujo llega directo al 8 se empieza a profundizar mas y se presenta socavación local en su punta hasta la cota 67.85 (2.15m de altura) por los remolinos que presenta el flujo; y seguidamente el cuenco se prolonga estrechándose, pero ahí es donde aparece el flujo secundario que amplía nuevamente la extensión del cuenco y produciendo la máxima socavación hasta la cota 66.33.

SEGUNDO CUENCO

Área de extensión en planta: 13826.68 m²

Volumen total socavado: 12901.13 m³

Cota superior: 69

Cota inferior: 65.58

Altura: 3.42 m

En esta parte gracias a los espolones el río logra bajar en general su fondo desde la cota 70 a la 69. Desde esta cota empieza la socavación en la cara aguas abajo del espolón 1, después de que el flujo rebote en el un poco, pero no mucho por que sigue en dirección al espolón 2 al cual lo rodea creando mas abajo de su punta unos remolinos que logran una socavación local leve hasta la cota 65.58, la más baja; después de esto el flujo no sigue una ruta clara si no que logra una socavación amplia pero no muy profunda que es controlada por los 2 siguientes espolones.

7.2.2 .2 Análisis plano 2

Es un tramo recto, en el que se ubican 4 espolones de los cuales el ultimo presenta muy poca socavación.

El cuenco de socavación producido tiene las siguientes características:

Área de extensión en planta: 29828.63 m²

Volumen total socavado: 37840.12 m³

Cota superior: 70

Cota inferior: 66

Altura: 4m

El flujo va directo a la orilla, pero se choca de frente con el espolón 10 quien lo controla y lo mantiene alejado de la orilla por un corto tramo por que más abajo intenta nuevamente atacar acercándose mucho, favorecido por la suave curvatura del borde pero que nuevamente es detenido por un espolón, el 19 que con su ángulo favorece alejar el flujo del banco, tanto que el efecto de socavación llega hasta el espolón 18 con muy poca profundidad a pesar de su gran área, y que es mas pequeña aun en el 9.

La mayor profundidad se alcanza cuando el flujo choca con el espolón 19, pues aguas arriba de él se generan remolinos formándose una fosa hasta la cota 66.04 (máx.); que se extiende mas allá del espolón.

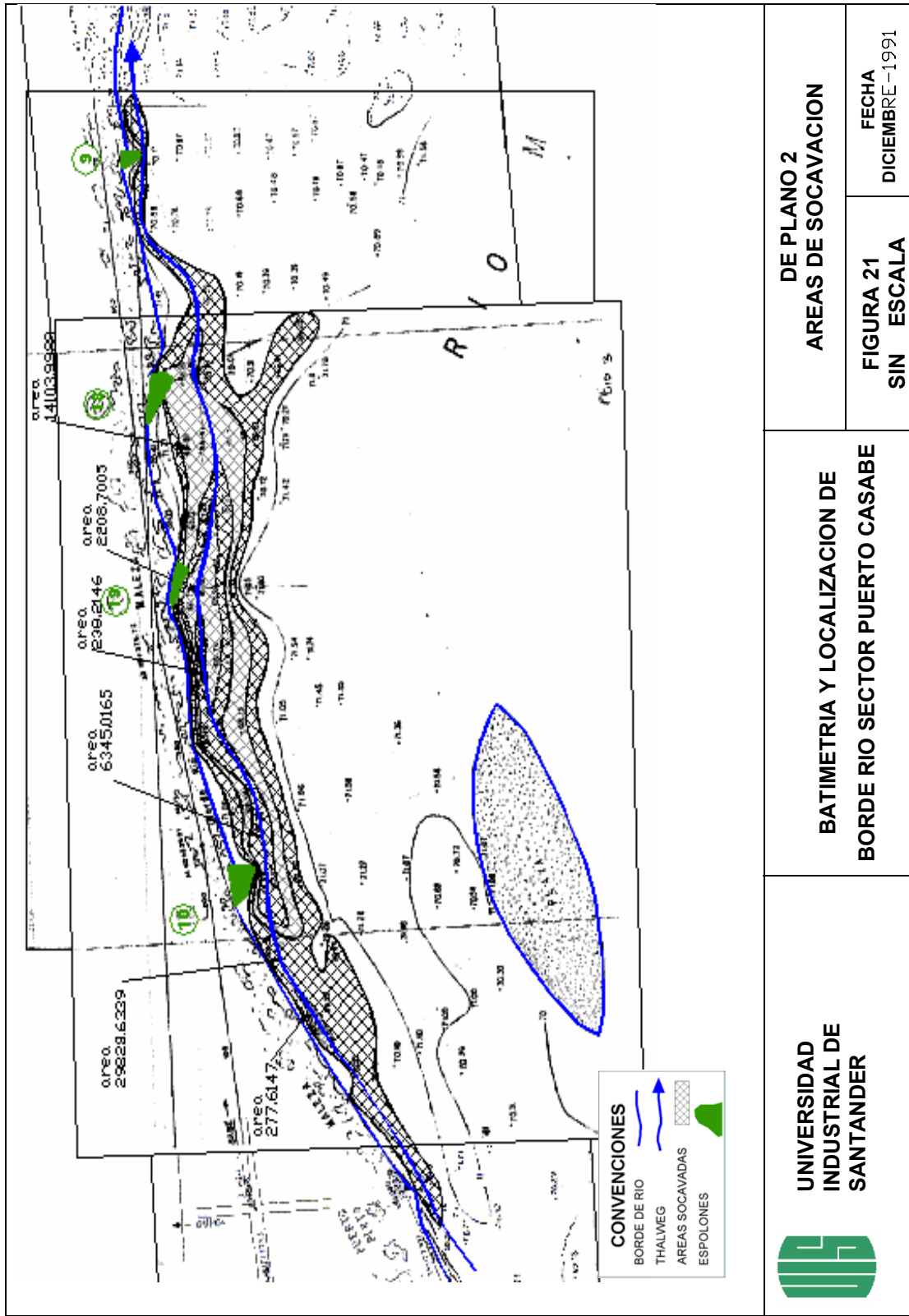


Figura 21. Plano 2



UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER

BATIMETRIA Y LOCALIZACION DE
BORDE RIO SECTOR PUERTO CASABE

DE PLANO 2
AREAS DE SOCAVACION

FIGURA 21
SIN ESCALA

FECHA
DICIEMBRE-1991

7.2.2 .3 Análisis plano 9

En este plano se encuentra el espolón # 33 que se ubica en la punta de la contracción del río a la altura de Casabe. La desviación del flujo que crea la contracción se representa con el thalweg dibujado en el plano, que al encontrarse con el que viene por la parte recta del río y con el espolón se crea socavación local después de su punta debido a los remolinos que se forman ahí, pero que luego se alarga bastante.

Área de extensión en planta: 42079.67 m²

Volumen total socavado: 41031.76 m³

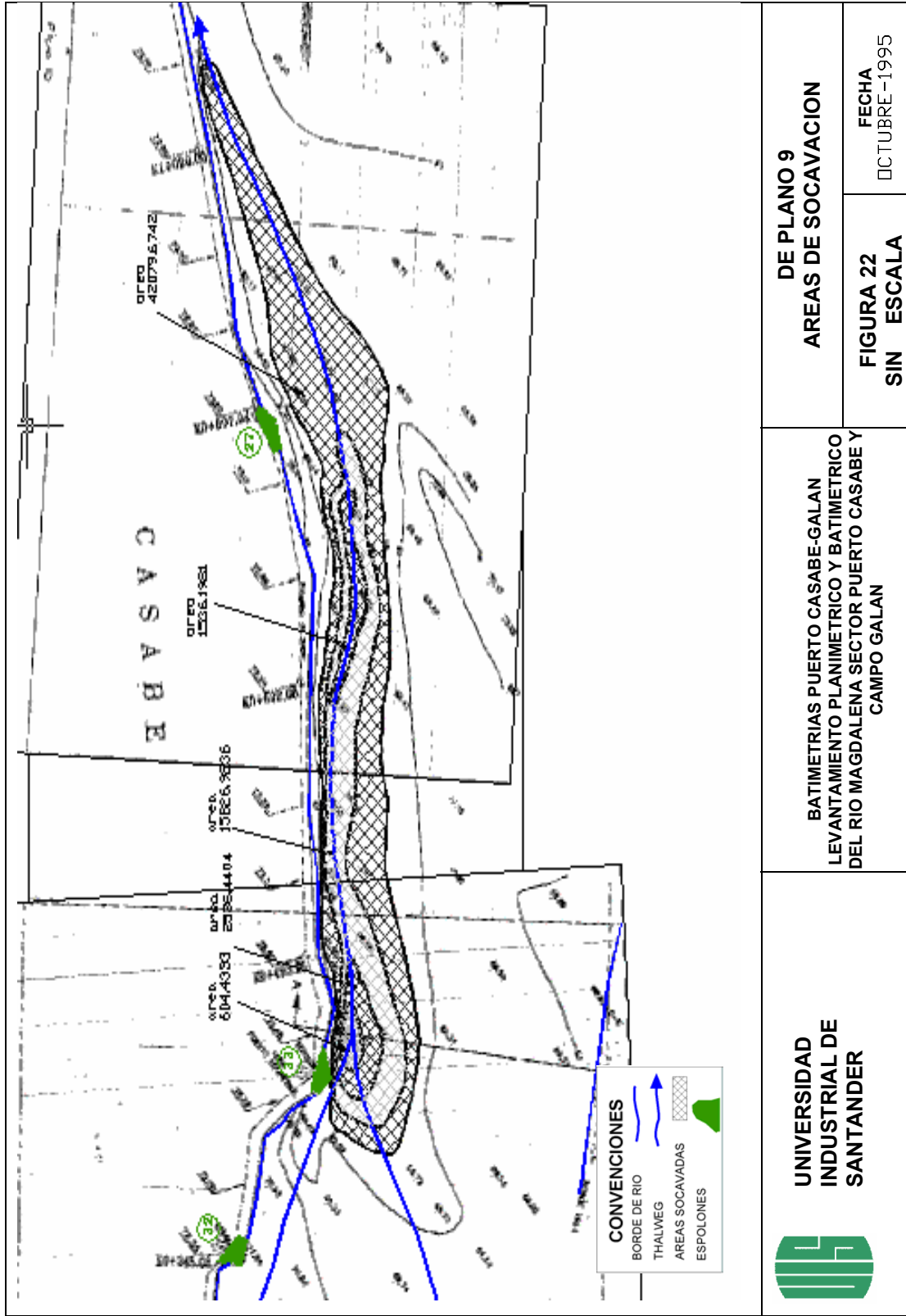
Cota superior: 68

Cota inferior: 64.11

Altura: 3.89 m

En ésta parte el río ya ha bajado su fondo al nivel 68 y la socavación local logra bajar el nivel hasta la cota 64.11, esto muestra que es una gran profundidad ocasionada solo por un espolón pero es que su ubicación es importante por que se encuentra en la punta de la contracción. La turbulencia que genera la contracción sumada al choque con el espolón logra formar una fosa con gran profundidad y de gran amplitud, por eso si no existiera este espolón ese borde del río sería claramente erosionado.

Después de la fosa del espolón 33 el thalweg se mantiene cerca al borde pero continúa su socavación alargándola hasta un punto donde se encuentra con una forma de la orilla que actúa como un espolón por que lo interrumpe provocándole nuevamente remolinos produciendo una fosa alargada pero no muy profunda; después de la cual el flujo se separa del borde socavando no tan profundo y sin atacar el espolón 27, pero más adelante de él si llega a



DE PLANO 9
AREAS DE SOCAVACION

BATIMETRIAS PUERTO CASABE-GALAN
LEVANTAMIENTO PLANIMETRICO Y BATIMETRICO
DEL RIO MAGDALENA SECTOR PUERTO CASABE Y
CAMPO GALAN

UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER

FIGURA 22
SIN ESCALA

FECHA
OCTUBRE-1995

tocar nuevamente el borde que sería el sitio ideal de ubicación del último espolón mencionado.

7.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS PLANOS

El siguiente cuadro muestra las características principales de los cuencos de los planos analizados anteriormente

Tabla 26. Comparación de cuencos de socavación.

CARACTERÍSTICA	Tramo curvo			Tramo recto			
	PLANO 3	PLANO 5	PLANO 6	PLANO 2	PLANO 4 CUENCO 1	PLANO 4 CUENCO 2	PLANO 9
Área de extensión en planta: m ²	12342	73934	42509	29829	22062	13827	42079
Volumen total socavado: m ³	23558	214287	140839	37840	32693	12901	41032
Cota superior:	70	70	70	70	70	69	68
Cota inferior:	65.26	57	62.06	66	66.33	65.58	64.11
Altura: m	4.74	13	7.94	4	3.67	3.42	3.89
Nivel de agua	74.4	75.65	74.5	70.5	71.9	71.6	71.5
No. de espolones cercanos al cuenco	7	3	8	4	3	3	2
Fecha	May 93	Nov 93	Ene94	Dic 91	May93	May93	Oct 95
Epoca	Invierno	Invierno	Verano	Verano	Invierno	Invierno	Invierno

Después del análisis por planos se puede dar por acertada la deducción de que al cuenco 1 del plano 4 llega un flujo secundario de entre las islas presentes ya que ningún otro cuenco llega a tomar esta forma de L; todos tienen una forma de ovalo alargado.

En las profundidades de socavación hay un valor muy superior a todos, que es el del plano 5 y la razón de esto es que en esa ocasión el río presentó de los niveles mas altos que se ha registrado en el Río Magdalena. Además en

este plano también se encuentran los datos de área y volumen más sobresalientes.

Los planos muestran que la socavación en el tramo curvo es mayor en volumen área y profundidad, a excepción del plano 3. Esta diferencia se presenta por la menor separación entre espolones requerida en las curvas por el choque directo del thalweg con la orilla, ya que la socavación en punta de cada espolón se superpone con las de los demás creando así fosas más amplias y profundas.

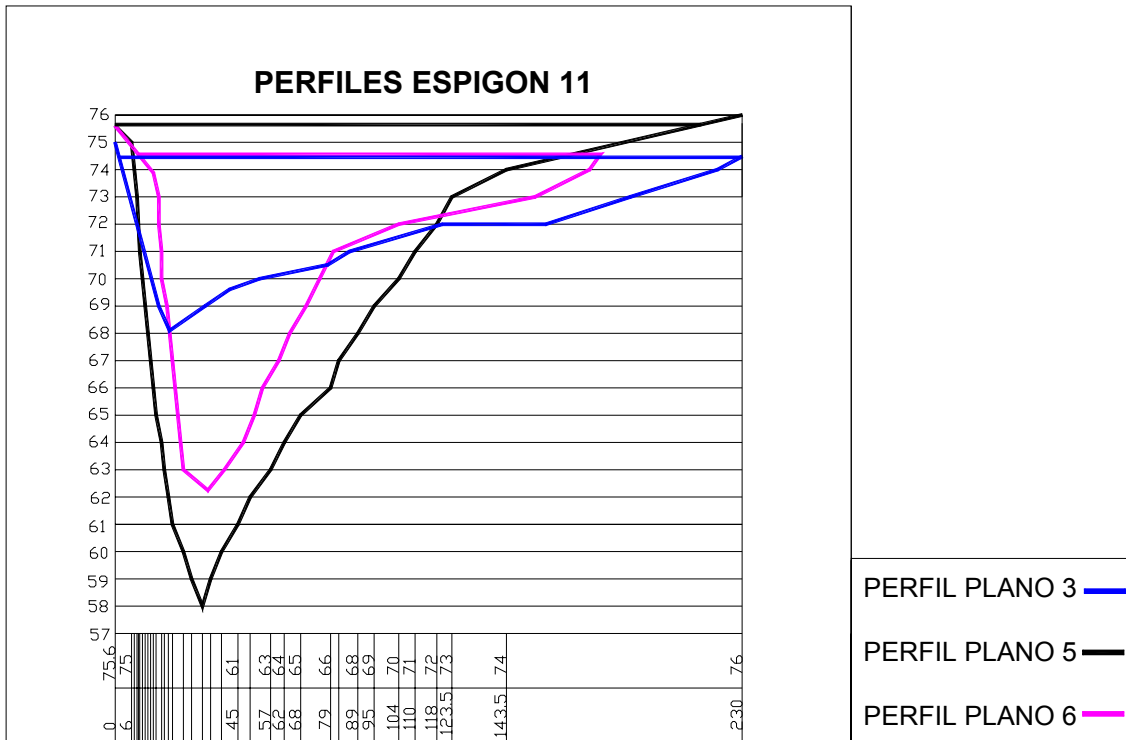


Figura 23. Comparación de perfiles.

En los perfiles se nota la variación del fondo del río. Es sobresaliente el poco volumen de socavación que presenta el río en el perfil 3 a pesar de estar en invierno, esto se da por que en dicho perfil el flujo tiene una velocidad menor a la velocidad crítica de socavación favorecido además por un gran ancho

del canal que se manifiesta con un nivel de agua muy parecido al perfil del plano 6 que está en verano. Sin embargo su profundidad es mayor que la presentada en los planos del tramo recto, que también presentan baja capacidad de transporte de material del lecho, esto se debe a su ubicación en el tramo curvo.

La comparación de perfiles manifiesta el proceso a través del tiempo, cuando el nivel del agua sube tanto en el perfil del plano 5 (Nov 93) se produce la máxima socavación de todos los planos, después en el perfil del plano 6 (Ene 94), que es época de verano, el nivel del agua baja y se nota un proceso de sedimentación disminuyendo la profundidad 5.06 m y el volumen en 73448.35m^3 del cuenco. Esto permite determinar que el fenómeno de la socavación no es siempre progresivo, quedando claro que es un proceso cíclico donde puede subir y bajar el nivel de socavación, que depende de la capacidad que tenga el flujo en un momento dado de arrastrar y transportar el material del lecho aguas arriba; y de la velocidad de caída de los materiales en suspensión en un flujo suave o turbulento, siendo así estos los factores que determinan si hay sedimentación o socavación.

El siguiente diagrama representa una fosa creada por los remolinos que son producto del choque del flujo con la punta de un espolón:

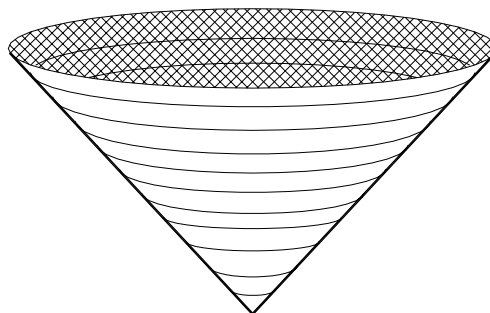


Figura 24. Representación de una fosa de socavación.

A continuación se explica el proceso de formación de las fosas más amplias y profundas en los tramos curvos:

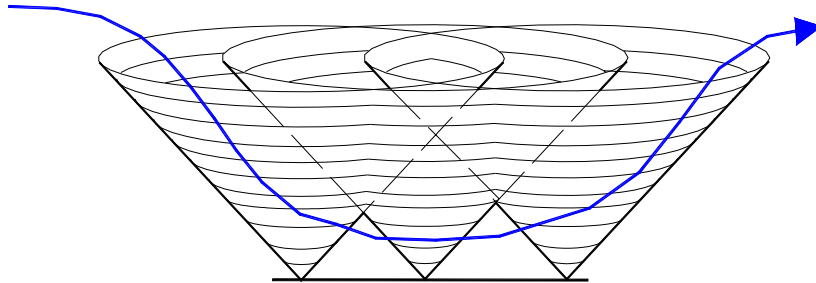


Figura 25. Superposición de fosas.

El diagrama muestra 3 fosas, que son provocadas cada una por un espolón, como están tan cercanos se superponen; la parte inferior no termina con 3 puntas individuales porque el thalweg erosiona las puntas quedando al final una fosa más amplia.

Cuando el thalweg ya ha erosionado las puntas de las 3 fosas, los remolinos siguen actuando y en conjunto con la acción socavadora del thalweg se va aumentando su profundidad como lo muestra el diagrama.

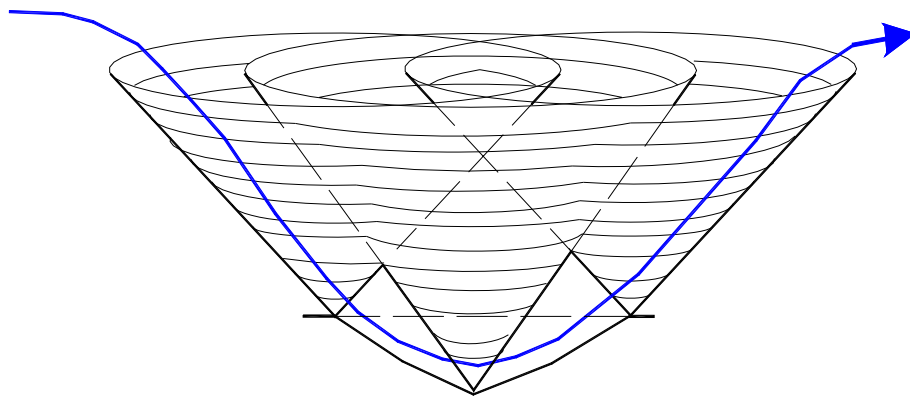


Figura 26. Profundización producida por la acción del thalweg.

El paso del thalweg a la entrada y salida de la fosa es el que va erosionando sus bordes dándoles la forma de óvalos, por eso se puede determinar el paso de este en un plano batimétrico siguiendo las puntas mas alargadas de los óvalos que presentan las curvas batimétricas. Esta erosión de las puntas de las fosas produce una socavación debida al grupo de espolones que se muestra en los siguientes diagramas:

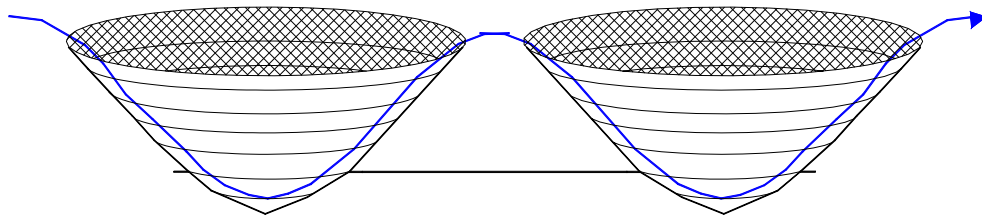


Figura 27. Fosas cercanas por acción de un grupo de espolones.

El diagrama muestra la superposición de fosas de 2 grupos un poco separados de 3 espolones cada uno (en una curva), creándose 2 fosas grandes y que con la presencia de algún espolón solitario entre ellas (que el flujo casi no ataca) y la acción erosiva del thalweg; forman un canal que las une y que aumenta así el volumen de socavación pero por acción del grupo, como se ve en el siguiente diagrama:

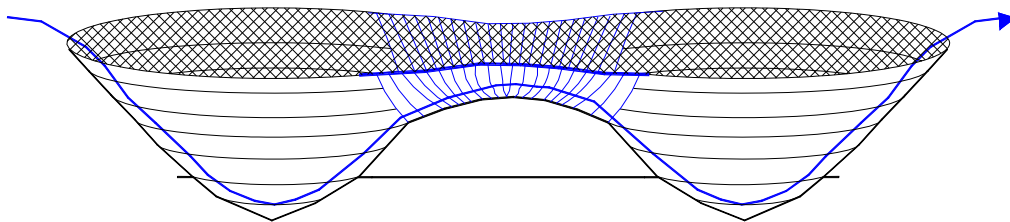


Figura 28. Canal producido por el thalweg entre fosas de un grupo de espolones.

El canal en azul se presenta por el grupo de espolones, es decir eso no se presentaría si los grupos de los espolones estuvieran más cercanos. En esa zona del canal azul no es que no exista un espolón, puede existir algún espolón ahí, pero como el flujo no choca contra el no provoca los remolinos y ese ahondamiento lo produce la constante erosión del thalweg a las fosas. Lo mismo ocurre en el tramo recto pero con la diferencia que las dos fosas del diagrama serían menos amplias y profundas ya que en él los espolones se encuentran mas separados (sin superponerse).

Los cuencos presentan una diferencia particular entre el tramo recto y el tramo curvo, y es que en el tramo curvo son determinados por curvas batimétricas, todas en forma de óvalos alargados; pero en el tramo curvo no todas las curvas batimétricas se cierran, las de los niveles más altos quedan abiertas formando un largo canal que en ningún plano se llega a ver donde termina. Pero se nota algo importante y es que dicho canal empieza cuando se termina la curva y empieza inmediatamente el tramo recto, esto indica que el flujo que llega por el tramo recto erosiona el borde de la segunda fosa formando el canal. El siguiente diagrama muestra las curvas batimétricas que definen los cuencos de socavación en el tramo curvo:

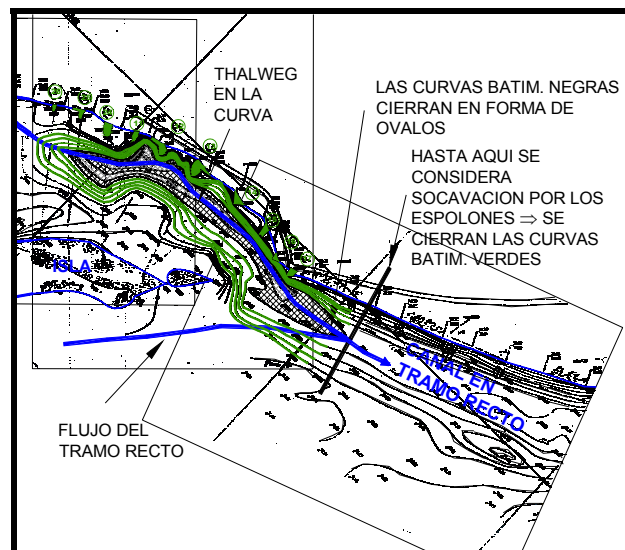


Figura 29. Ejemplo de curvas batimétricas del plano 6.

El diagrama muestra que es difícil determinar en el tramo curvo hasta que punto llegaría el área de socavación producida por los espolones y por eso se hace cerca de donde esta la ultima curva batimétrica cerrada, de ahí en adelante el canal no se toma como producto de los espolones sino que es por la erosión que produce el flujo que viene detrás de las islas. Explicado con el siguiente diagrama.

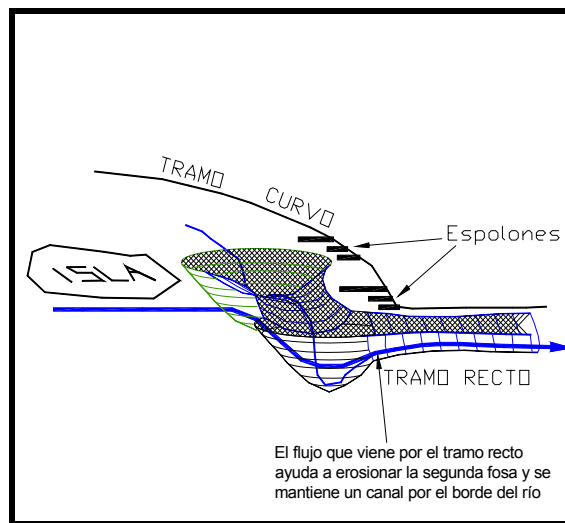


Figura 30. Canal producido después de la socavación en el tramo curvo.

El flujo que viene al otro lado de las islas ayuda a erosionar el borde del cuenco que esta llegando al tramo recto, formándose así un canal, y por lo tanto el volumen del canal no se puede considerar resultado de los espolones.

Las teorías generalizan que siempre el primer espolón es muy importante por que es el que soporta el choque directo del flujo, pero en los planos se puede notar que eso no siempre es así como en el plano número 6 donde los primeros 2 espolones no actúan, si no es a partir del tercero que aparece la

socavación; esto se da por que a partir de él el thalweg se acerca a atacar las estructuras.

La forma de los cuencos ratifica que los espolones logran apartar el flujo de la orilla, pero solo por un corto tramo por que vuelven hacia ella. Este fenómeno comprueba que un espolón no es suficiente para controlarlo, se necesitan otros espolones seguidos donde su número y separación requiere un estudio específico, pues lo único que se puede generalizar en este sentido es que en curva las separaciones son menores que en tramo recto.

El choque directo del flujo cerca de la punta de los espolones origina los remolinos que son el agente socavador que produce las fosas, y la ubicación de estas con respecto a los espolones depende del ángulo con que llega el flujo a chocar con ellos.

La separación entre los espolones permite que la socavación los rodee afectando significativamente su cimentación.

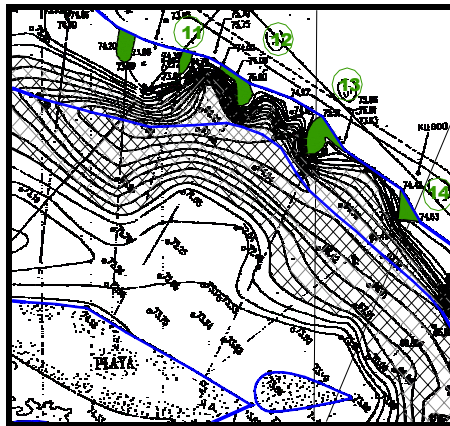


Figura 31. Socavación rodeando la punta de los espolones.

Si los espolones producen un estrechamiento grande en el canal, la socavación que ellos producen termina siendo una profundización para todo

el canal; aplicación que se podría aprovechar para cuando se requiere profundizar un canal para navegación. Pero para este caso la turbulencia generada por los remolinos debe reducirse, lo que requiere que el choque del flujo con la punta de los espolones se suavice; y esto se logra si la punta de los espolones coinciden formando un borde imaginario adecuado que recibe el flujo suavemente, como se muestra en el siguiente ejemplo

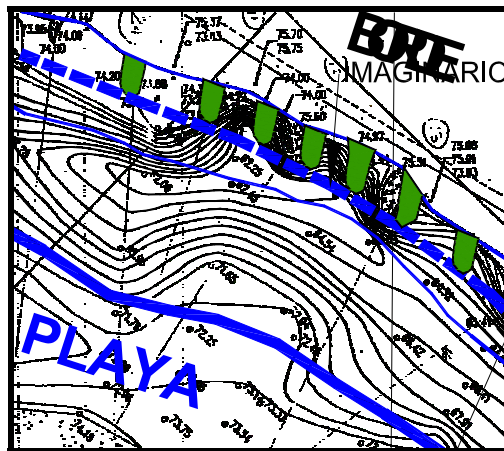


Figura 32. Ejemplo espolones para un canal navegable.

Para suavizar el choque y crear cada vez un borde imaginario mas claro, se requiere mayor número de espolones, para que queden con menos separación entre ellos y no permitan que las líneas de corriente entren y se acerquen a la orilla; así el flujo no puede bordear el espolón como lo hacia anteriormente afectando menos su cimentación. Además como crean un estrechamiento significativo, la socavación se crea por casi todo el canal con poca formación de fosas, sino un solo canal pues los efectos se superponen y crean una socavación casi uniforme.

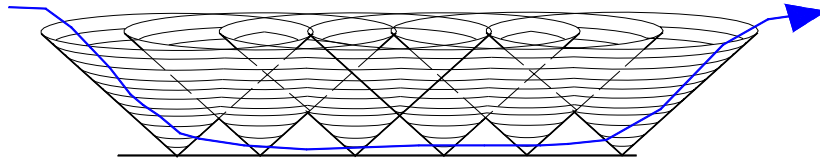


Figura 33. Representación de superposición de fosas para canal navegable.

El diagrama muestra remolinos de menor profundidad (el choque se suavizó) pero todos mas seguidos pues todos los espolones deben mantenerse a un poca separación similar en todo el tramo.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El tema de la socavación se inició con las investigaciones de Laursen en 1949, desde entonces se han presentado muy pocos estudios detallados sobre el tema, que se han enfocado principalmente en la producida por las pilas y estribos de los puentes, por la importancia de estas estructuras. Por esta razón son aun más escasos los estudios de la socavación en la punta de los espolones, limitando su tratamiento para el diseño como un tema secundario. Este proyecto pretende aportar a este camino apenas iniciado.

El presente estudio ha dejado como conclusión principal que en la gran variabilidad que se presenta en un río los diseños de los espolones no se pueden hacer con las características del río actual, es necesario analizar muchos factores a través del tiempo para predecir futuros cambios y sobre todo los ciclos de las épocas de lluvia.

El estudio de las formulaciones para estimar la profundidad de socavación producida por un solo espolón, permite concluir que con ninguna de ellas se obtienen resultados acertados.

No se recomienda el uso de la ecuación de Suzuki para calcular la socavación debida a un grupo de espolones; ya que en los planos no se observó el patrón de comportamiento supuesto para su deducción. Así mismo la socavación producida por contracción del cauce es despreciable comparada con la presentada por los efectos locales de la estructura debido a la baja relación entre la longitud de los espolones y el ancho del canal ($n=L/B$).

El diseño de los espolones requiere un estudio histórico del paso del thalweg para determinar en que puntos ha atacado mas la orilla y así poder hallar la ubicación y el número de espolones necesario, para evitar separaciones excesivas o por lo contrario evitar la construcción de obras que no aportan a controlar el flujo.

Según el comportamiento del ataque del flujo a la orilla se ve que casi siempre es el grupo de los primeros espolones el que soporta el choque por eso se recomienda que los espolones de este grupo se diseñen para soportarlo y con una separación menor que los del segundo grupo para evitar que entre ellos haya erosión de la orilla. Los espolones del segundo grupo no necesitan estar tan seguidos por que cuando el flujo se acerca a ellos ya debe estar controlado por el primer grupo y la única función que tienen que cumplir es mantener las líneas de corriente en la dirección deseada; pero esto no quiere decir que en ellos no se presente socavación.

Es favorable diseñar el ángulo del espolón teniendo información sobre en que dirección lo golpearía el flujo para que así se localice la fosa de socavación al sitio escogido como más adecuado o menos dañino. Pero se recomienda que los ángulos no sean mayores de 90° por que con ellos se puede acercar la socavación a la orilla poniendo en riesgo su estabilidad.

La fosa que es el punto de socavación más grande, generalmente está ubicada en la punta de los espolones nunca entre ellos por eso es buena opción diseñarlos con longitudes mas largas para alejarlas de la orilla, si así se requiere, además se recomienda construir un colchón en el fondo de la punta si es primordial disminuirla y apartarla.

La construcción de un grupo de espolones en cualquier tramo de un río, debe garantizar que una vez controlen el flujo lo mantengan así, es decir si se ven amenazadas las obras por cualquier factor, solo lleguen a colapsar algunos espolones, para que los restantes sigan actuando dando tiempo para reparar los daños.

La historia de los primeros espolones construidos en tierra y protegidos con empalizadas muestra que este material no resiste los ataques del río.

Los hexápodos que es el material de construcción de los espolones del río Magdalena, es un sistema adecuado para un río tan impredecible, importante y fuerte, por su fácil método constructivo que le permite la versatilidad de ir agregando hexápodos para ampliar la longitud y/o altura de un espolón en un momento dado que se requiera, o la reparación parcial de las obras.

Una mayor longitud es buena solución para apartar las fosas de la orilla, y si este es el caso se recomienda se combine con el estudio adecuado del ángulo de choque con el flujo para garantizar que se mantiene dentro de los límites de resistencia y flexibilidad de la obra; factores que a su vez requieren el conocimiento de las características del tipo de material utilizado.

La socavación depende del tipo de material de lecho, y la capacidad que tiene el flujo en un momento dado de erosionarlo y arrastrarlo o transportarlo en suspensión. Las épocas de lluvias determinan los cambios de niveles del río y a su vez esto afecta la capacidad del río de transportar material, por eso es que los meses de niveles de agua altos coinciden con grandes socavaciones; y los meses secos con bajos niveles del río coinciden con sedimentación en los cuencos de socavación disminuyendo así su profundidad.

Siendo el material de lecho el que determina la socavación, entonces en un río con un material de lecho mas pesado (mayor tamaño) o más cohesivo será más difícil de socavar que un lecho con material suelto o pequeño y poco pesado. Además se debe estudiar hasta que profundidades el material cambia a uno más resistente que frene el efecto socavador, esto es muy importante por que se debe tener presente que si los remolinos que producen la socavación encuentran un obstáculo no muy profundo en el fondo es posible que se extiendan hacia los lados amenazando directamente las orillas y así el efecto puede salir mas dañino que sino se hubieran construido los espolones.

Los espolones se pueden utilizar cuando el río tiene capacidad de transporte de sedimentos para generar depósitos entre o delante de ellos y de este modo proteger la orilla y a su vez generar fosas mucho más grandes en las puntas de los espolones que las que se crean cuando el río es incapaz de transportar material del lecho traduciendo en la mejora de la profundidad para la navegabilidad del cauce.

Un grupo de espolones logra ahondar un canal para habilitarlo para la navegación, si logran un estrechamiento significativo en él y se ubican de manera que describan un borde imaginario en las partes donde se vea en batimetrías históricas que el thalweg mas ataca la orilla.

Los grandes volúmenes de socavación no están afectando la dinámica fluvial del río Magdalena en la zona de estudio, la única obra aguas abajo importante que podría verse afectada es la del puente de Yondó. Sin embargo su efecto no es claro.

En la literatura se encuentra que entre los espolones se puede producir una sedimentación tal que se llega a formar una nueva orilla, pero este no es el

caso de los espolones del río Magdalena, primero que todos los ubicados en curva difícilmente lograrán eso en cualquier río pero los ubicados en el tramo recto tampoco lo logran por que la relación largo de los espolones y ancho del canal es pequeña. (Estos espolones son muy pequeños para correr la orilla del río Magdalena)

Se recomienda realizar un estudio completo de la dinámica del río Magdalena en el sitio de Barrancabermeja teniendo en cuenta la gran cantidad de información disponible. Analizar cada obra por separado, no es recomendable debido a la interrelación que existe entre todos los elementos del río.

Se recomienda desarrollar procedimientos teóricos para el cálculo de socavación aplicados a los Ríos Colombianos.

BIBLIOGRAFIA

- GONZÁLEZ GUDIÑO, Jairo Edmundo, Tesis De La Socavación De Espolones Bajo Condiciones De Transporte De Sedimentos. Universidad De Los Andes
- Informe De Hidrología, Hidráulica Y Socavación, Estudio Y Diseño Del Puente Sobre El Río Magdalena En La Carretera Barrancabermeja-Yondo, Julio 2002.
- Informe #1, Análisis Del Comportamiento Del Río Magdalena Frente A La Estación Galán Y Planta De Propano, Elaborado Por La Empresa De Ingeniería De Suelos Ltda. Instituto De Investigación Sobre Deslizamientos Y Erosión Para ECOPETROL
- Informe #2, Geología Y Geotecnia Del Complejo Industrial De Barrancabermeja Y De La Estación Galán Y Planta De Propano, Elaborado Por La Empresa De Ingeniería De Suelos Ltda. Instituto De Investigación Sobre Deslizamientos Y Erosión Para ECOPETROL, 1997.
- Informe #3 Estudio Para La Estabilización De La Margen Derecha Dentro Del Río Magdalena, Elaborado Por La Empresa De Ingeniería De Suelos Ltda De Investigación Sobre Deslizamientos Y Erosión Para ECOPETROL, 1997

- ROJAS ROJAS, Jorge Humberto, Estudio De Las Corrientes Entre Espolones y su Efecto En Las Corrientes Secundarias. Universidad de los Andes.
- Pagina De Internet De La Empresa Maccaferri
- A.J. RAUDKIVI, Loose Boundary Hydraulics, Editorial A. Wheaton & Co., 1976
- PILARCZYK, K.W, Fundamentals of river engineering, 1998.
- AGUIRRE, Julián, Hidráulica De Sedimentos, 1977.
- Estudio Sobre El Modelo Hidráulico De Fondo Móvil Elaborado por la Universidad Nacional De Colombia Para La Corporación Autónoma Regional Del Río Grande De La Magdalena (Cormagdalena.
- Informe Final Presentado Por El Consorcio Desarrollo De Vías En El Estudio De Suelos Y Cimentación Del Puente Barrancabermeja-Yondo (Santander-Antioquia.
- Del Informe No 2738/ 90 Realizado Por Maldonado Ingeniería S.A. Del Puente Sobre El Río Magdalena Entre Yondo Y Barrancabermeja, Transparencia Hidráulica, Bogota, Marzo 1990.

ANEXOS

Datos IDEAM

Estación	Coordenadas	Fecha	Cota	Niveles medios	Cota del nivel
Barrancabermeja	N =1271049,263	Sep-90	68,8046	2,51	71,3146
	E =1023672,064			2,54	71,3446
				2,37	71,1746
				2,69	71,4946
				2,71	71,5146
				2,33	71,1346
				2,22	71,0246
				2,14	70,9446
				2,19	70,9946
				2,48	71,2846
				2,35	71,1546
				2,17	70,9746
				2,36	71,1646
				2,64	71,4446
				3,2	72,0046
				3,37	72,1746
				2,74	71,5446
				2,89	71,6946
				1,9	70,7046
				1,83	70,6346
				1,77	70,5746
				2	70,8046
				2,48	71,2846
				2,68	71,4846
				2,44	71,2446
				2,67	71,4746
				2,39	71,1946
				2,52	71,3246
				2,57	71,3746
				2,54	71,3446

Barrancabermeja	N =1271049,263	Dic-91	68,8046	3,41	72,2146
	E =1023672,064			3,05	71,8546
				2,93	71,7346
				3,39	72,1946
				3,28	72,0846
				3,13	71,9346
				3,03	71,8346
				2,93	71,7346
				2,9	71,7046
				3	71,8046
				3,29	72,0946
				3,11	71,9146
				3,16	71,9646
				3,21	72,0146
				2,89	71,6946
				2,75	71,5546
				2,79	71,5946
				2,91	71,7146
				3,08	71,8846
				3,04	71,8446
				3,18	71,9846
				2,95	71,7546
				2,83	71,6346
				2,87	71,6746
				2,92	71,7246
				2,87	71,6746
				2,8	71,6046
				2,73	71,5346
				2,69	71,4946
				2,93	71,7346
				2,95	71,7546
Barrancabermeja	N =1271049,263	May-93	68,8046	3,82	72,6246

	E =1023672,064			3,99	72,7946
				3,59	72,3946
				3,85	72,6546
				3,88	72,6846
				4,11	72,9146
				4,34	73,1446
				4,19	72,9946
				4,2	73,0046
				4,14	72,9446
				4,24	73,0446
				4,21	73,0146
				3,85	72,6546
				4,1	72,9046
				4,06	72,8646
				3,68	72,4846
				3,22	72,0246
				3,18	71,9846
				3,41	72,2146
				3,46	72,2646
				3,6	72,4046
				3,91	72,7146
				3,67	72,4746
				4,03	72,8346
				3,77	72,5746
Barrancabermeja	N =1271049,263	May-93	68,8046	4,18	72,9846
	E =1023672,064			4,32	73,1246
				4,41	73,2146
				4,41	73,2146
				4,34	73,1446
				4,18	72,9846
Barrancabermeja	N =1271049,263	Nov-93	68,8046	2,92	71,7246
	E =1023672,064			3,08	71,8846
				3,44	72,2446

				3,83	72,6346
				4,08	72,8846
				4,03	72,8346
				3,5	72,3046
				3,84	72,6446
				3,71	72,5146
				3,42	72,2246
				3,37	72,1746
				4,13	72,9346
				3,59	72,3946
				3,9	72,7046
				4,11	72,9146
				4,1	72,9046
				4,12	72,9246
				3,94	72,7446
				4,01	72,8146
				4,04	72,8446
				3,34	72,1446
				3,08	71,8846
				3,91	72,7146
				2,79	71,5946
				2,65	71,4546
				2,28	71,0846
				2,16	70,9646
				2,22	71,0246
				2,14	70,9446
				2,23	71,0346
Barrancabermeja	N =1271049,263	Ene-94	68,8046	2	70,8046
	E =1023672,064			1,95	70,7546
				1,92	70,7246
				1,85	70,6546
				1,91	70,7146
				1,92	70,7246

				1,85	70,6546
				1,87	70,6746
Barrancabermeja	N =1271049,263	Ene-94	68,8046	1,93	70,7346
	E =1023672,064			1,99	70,7946
				2,17	70,9746
				2,23	71,0346
				2,29	71,0946
				2,37	71,1746
				2,58	71,3846
				3,05	71,8546
				3,03	71,8346
				2,87	71,6746
				2,8	71,6046
				2,69	71,4946
				2,51	71,3146
				2,44	71,2446
				2,37	71,1746
				2,14	70,9446
				2,07	70,8746
				2,02	70,8246
				1,94	70,7446
				1,92	70,7246
				2,1	70,9046
				2,08	70,8846
				2,13	70,9346
Barrancabermeja	N =1271049,263	Dic-94	68,8046	4,41	73,2146
	E =1023672,064			4,34	73,1446
				4,19	72,9946
				3,96	72,7646
				3,83	72,6346
				3,69	72,4946
				3,53	72,3346
				3,21	72,0146

				2,9	71,7046
				2,78	71,5846
Barrancabermeja	N =1271049,263	Jun-96	68,8046	4,33	73,1346
	E =1023672,064			4,38	73,1846
				4,4	73,2046
				4,33	73,1346
				4,33	73,1346
				4,35	73,1546
				3,95	72,7546
				3,63	72,4346
				3,43	72,2346
				3,08	71,8846
				2,9	71,7046
Barrancabermeja	N =1271049,263	Jun-96	68,8046	3	71,8046
	E =1023672,064			2,73	71,5346
				2,8	71,6046
				3,33	72,1346
				3,28	72,0846
				3,28	72,0846
				3,25	72,0546
				3,63	72,4346
				3,1	71,9046
				3,25	72,0546
				3,28	72,0846
				3,1	71,9046
				2,85	71,6546
				2,68	71,4846
				3,35	72,1546
				3,8	72,6046
				3,63	72,4346
				4,08	72,8846
				4,2	73,0046

Maldonado	N =1287635,35	Sep-90	64,202	3,5	67,702
	E =1016300,87			3,43	67,632
				3,4	67,602
				3,58	67,782
				3,4	67,602
				3,33	67,532
				3,19	67,392
				3,21	67,412
				3,34	67,542
				3,58	67,782
				3,39	67,592
				3,39	67,592
				3,46	67,662
				3,68	67,882
				3,92	68,122
				3,55	67,752
				3,33	67,532
				3,15	67,352
				3,15	67,352
				3,17	67,372
				3,14	67,342
				3,2	67,402
Maldonado	N =1287635,35	Sep-90	64,202	3,5	67,702
	E =1016300,87			3,78	67,982
				3,5	67,702
				3,64	67,842
				3,68	67,882
				3,55	67,752
				3,55	67,752
				3,39	67,592
Maldonado	N =1287635,35	Dic-91	64,202	4,55	68,752
	E =1016300,87			4,4	68,602
				4,21	68,412

				4,41	68,612
				4,1	68,302
				4,13	68,332
				4,12	68,322
				3,79	67,992
				3,72	67,922
				3,88	68,082
				4,28	68,482
				4,11	68,312
				4,01	68,212
				3,83	68,032
				3,77	67,972
				3,62	67,822
				3,63	67,832
				-	
				-	
				3,94	68,142
				3,98	68,182
				3,67	67,872
				3,79	67,992
				3,6	67,802
				3,46	67,662
				3,43	67,632
				3,41	67,612
				3,37	67,572
				3,21	67,412
				3,26	67,462
				3,23	67,432
Maldonado	N =1287635,35	May-93	64,202	5,07	69,272
	E =1016300,87			5,31	69,512
				5,11	69,312
				5,21	69,412
				5,32	69,522

Maldonado	N =1287635,35	May-93	64,202	5,51	69,712
	E =1016300,87			5,5	69,702
				5,48	69,682
				5,35	69,552
				5,46	69,662
				5,41	69,612
				5,36	69,562
				5,13	69,332
				5,25	69,452
				5,22	69,422
				-	
				-	
				4,66	68,862
				6,68	70,882
				-	
				4,83	69,032
				-	
				-	
				-	
				-	
				5,5	69,702
				5,71	69,912
				5,74	69,942
				5,7	69,902
				5,64	69,842
				5,51	69,712
Maldonado	N =1287635,35	Nov-93	64,202	3,83	68,032
	E =1016300,87			4,28	68,482
				4,5	68,702
				4,86	69,062
				5,06	69,262
				5,08	69,282
				4,95	69,152

				4,83	69,032
				4,77	68,972
				4,58	68,782
				4,91	69,112
				5,3	69,502
				5,31	69,512
				5,25	69,452
				5,36	69,562
				5,36	69,562
				5,16	69,362
				5,05	69,252
Maldonado	N =1287635,35	Nov-93	64,202	5,04	69,242
	E =1016300,87			-	
				5,24	69,442
				5,28	69,482
				5,05	69,252
				5,24	69,442
				5,23	69,432
				5,33	69,532
				5,25	69,452
				5,31	69,512
				5,39	69,592
				5,6	69,802
Maldonado	N =1287635,35	Ene-94	64,202	2,84	67,042
	E =1016300,87			2,77	66,972
				2,76	66,962
				2,73	66,932
				2,81	67,012
				2,89	67,092
				2,8	67,002
				2,77	66,972
				2,77	66,972

				3,07	67,272
				3,18	67,382
				3,24	67,442
				3,35	67,552
				3,26	67,462
				3,38	67,582
				3,94	68,142
				3,85	68,052
				3,9	68,102
				3,67	67,872
				3,37	67,572
				3,2	67,402
				3,1	67,302
				3,02	67,222
				2,97	67,172
				2,86	67,062
				2,86	67,062
				2,72	66,922
				2,68	66,882
				2,62	66,822
				2,86	67,062
				3,05	67,252
Maldonado	N =1287635,35	Dic-94	64,202	5,42	69,622
	E =1016300,87			5,28	69,482
				5,05	69,252
				4,88	69,082
				4,7	68,902
				4,64	68,842
				4,5	68,702
				4,36	68,562
				4,27	68,472
				4,11	68,312
Maldonado	N =1287635,35	Jun-96	64,202	5,74	69,942

	E =1016300,87			5,73	69,932
				5,69	69,892
				5,69	69,892
				5,68	69,882
				5,62	69,822
				5,53	69,732
				5,24	69,442
				5,1	69,302
				4,92	68,862
				4,66	68,652
				4,45	68,602
				4,4	68,532
				4,33	68,852
				4,65	68,792
				4,59	68,842
				4,64	68,822
				4,62	69,102
				4,9	68,822
				4,62	69,102
				4,67	68,822
				4,7	68,872
				4,55	68,902
				4,39	68,752
				4,25	68,592
				4,6	68,452
				5,12	68,802
				5,29	69,322
				5,3	69,492
				5,38	69,502

PESOS UNITARIOS

En el informe final presentado por el CONSORCIO DESARROLLO DE VIAS en el estudio de suelos y cimentaciones puente Barrancabermeja-Yondo (Santander –Antioquia),se recolectó la siguiente información de los sondeos realizados en el que seria el eje del puente.

Margen izquierda

cota. 72.50 m.

Abscisa: k1+0.76

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (ton/m ³)
0	Altura del planchón	
1		
2	Agua	
2.5	Arena fina gris clara	1.53
3		
4		
4.25		1.55
5		
6		
6.3		1.7
7		
8		
9		
9.7		1.7
10		
11		
12		
12.5	1.58	
13		

Margen izquierda

Cota: 72.20m.

Abscisa: ko +997

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (ton/m³)
0	Altura planchón	
1		
2	agua	
2.5		
3	Arena gruesa a fina gris clara	1.425
4		
5		1.5
6		
6.5		1.65
7		
8		
9		1.78
10	Arena fina gris clara	
10.5		1.75
11		
12		1.75
13		
14		
14.5		1.6
15		

Margen izquierda

Cota. 73.40 m.

Abscisa: k1 + 438

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (ton/m³)
0		
0.5	Limo arenoso café y gris	1.45
1	Arena fina limosa gris y carmelita clara	
1.75		1.45
2		
3		1.9
4		
4.6		1.5
5		
6		1.5
7		
7.5		1.55
8		
9	1.9	
10	Arena fina limosa gris y carmelita clara con grava fina y arena media a gruesa	
10.5		1.9
11		1.9
12		
12.5		1.85
13		
14		
14.5		1.6
15		1.65
16		1.75
17		
17.8	1.9	
18		
19		
19.5	1.9	
20		
21	1.9	
21.5		

Margen derecha

Cota:

Abscisa: k1 +146

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (ton/m³)
0	Arena gris, limo orgánico	
0.5	oscuro	1.5
1		
1.7		1.45
2		
3		
4		1.7
5		
6	Arena gris de grano	
7	medio a fino	
8		1.5
9		
10		1.6
11		
12		
13		
14		
15		
15.5	Arena gris con gravilla	1.58
16	con algo de limo	
17		
18		
19		
20	turba	

Margen izquierda

Cota

Abscisa: k1 +226

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (ton/m³)
0	Arena fina gris limosa	
0.5		
1	Arena de grano medio o fino limpia cuarzosa gris	1.5
1.5		
2		
3		1.65
4	Arena de grano medio a fino limpia cuarzosa gris	
5		
5.25		1.48
6		
7		1.48
8		
9		1.5
10		
11		
12		
13		1.85
14		
14.5		1.73
15		
16		
16.5	1.75	
17		
18		
18.5	1.75	
19		
20		
20.5	1.9	
21		
22		

23		1.9
24		

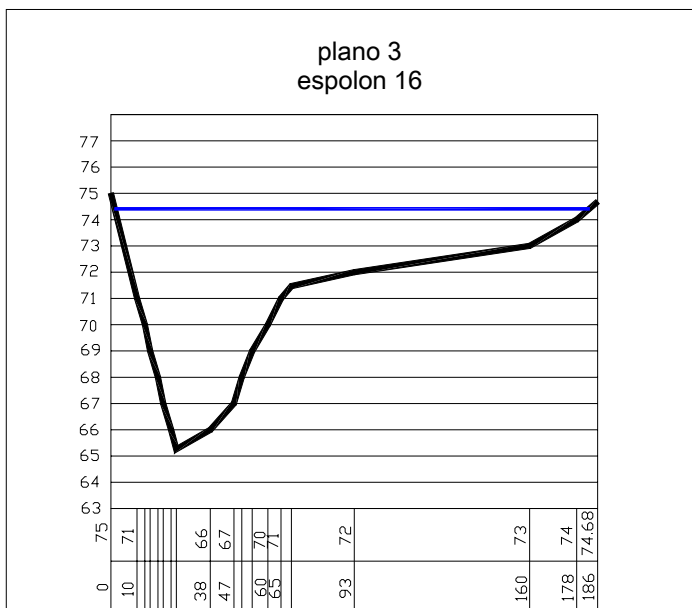
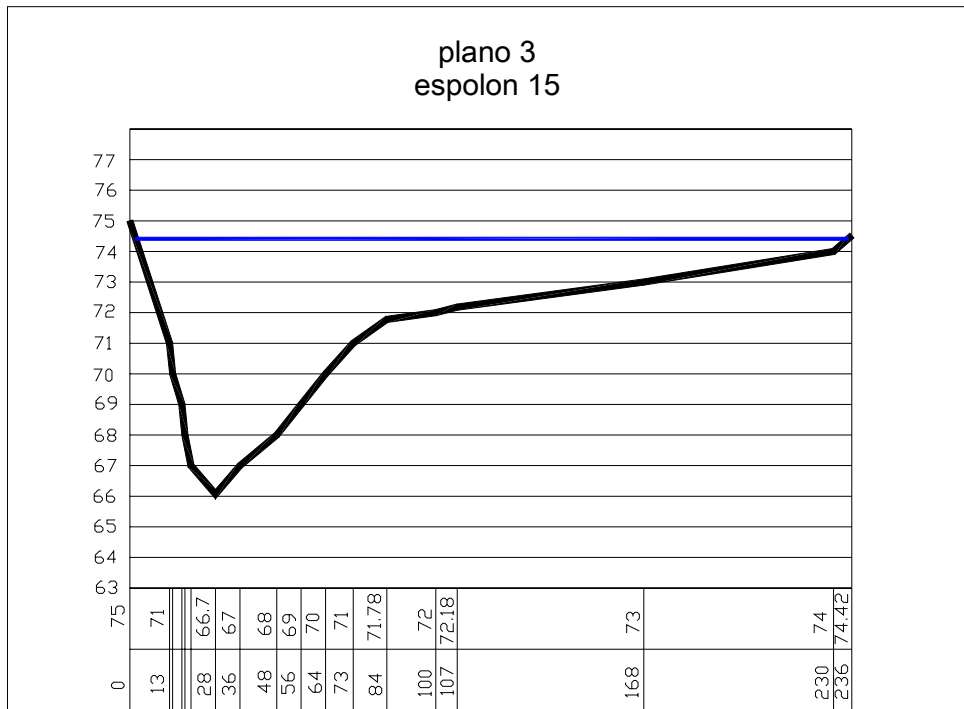
Margen izquierda

co

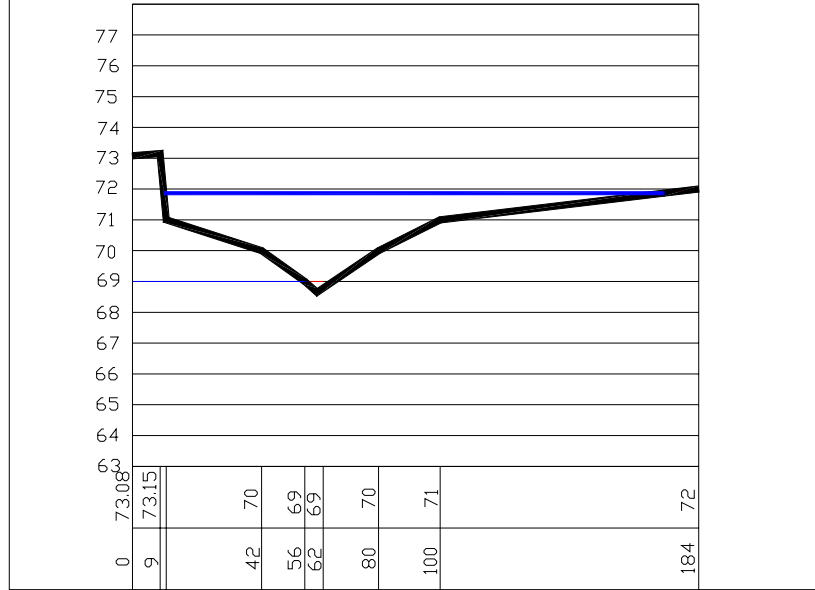
abscisa: k1 +306

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (ton/m³)
0	Arena de grano medio a fino gris con gravilla ocasional	
1		1.48
2		
2.5		1.45
3		
4		
4.5		
5		
6		
6.5		1.53
7		
8		
8.2		1.9
9		
10	Grava en matriz arenosa gris. Fragmentos de roca de diferentes composiciones	
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

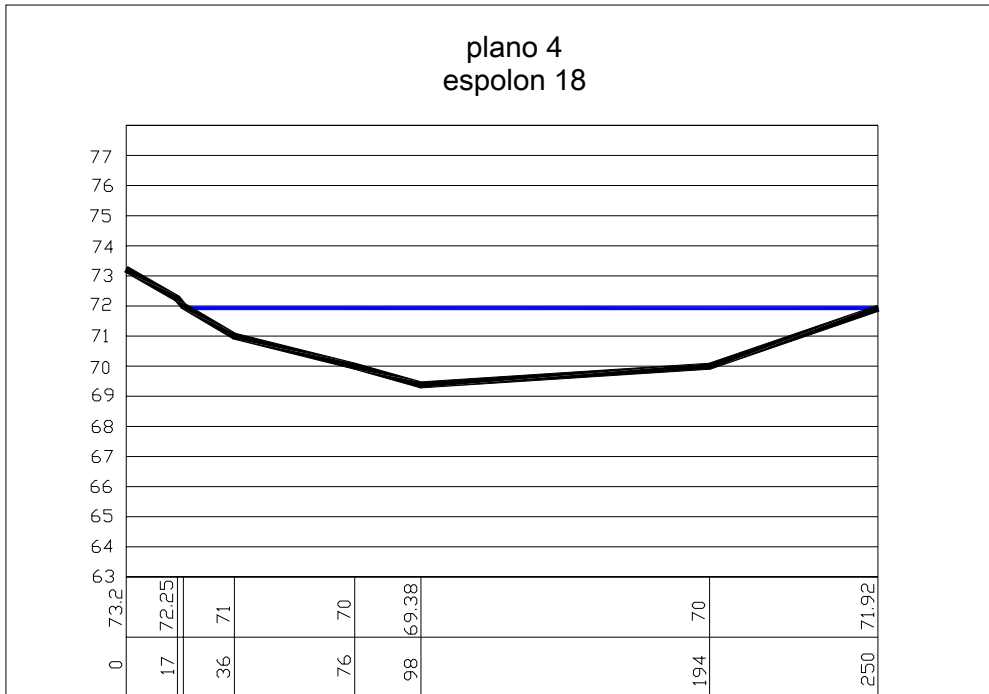
PERFILES BATIMETRICOS



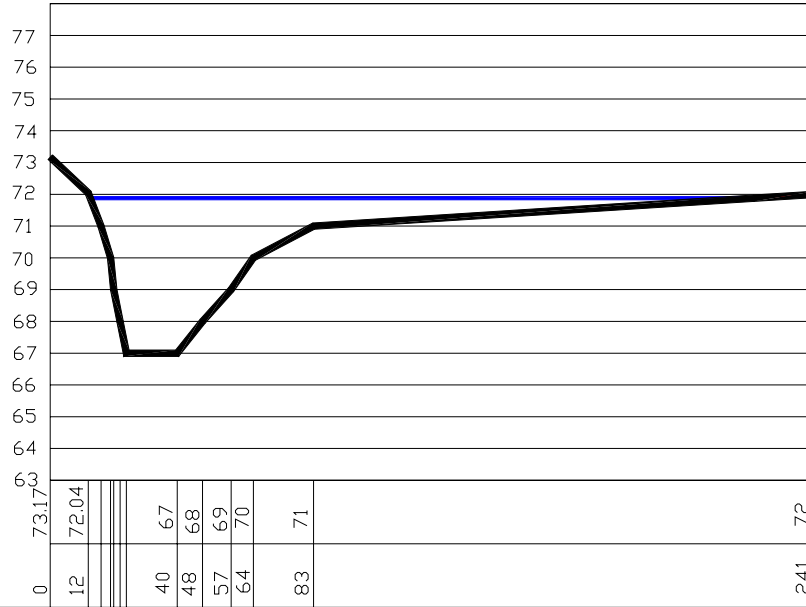
plano 4
espolon 1



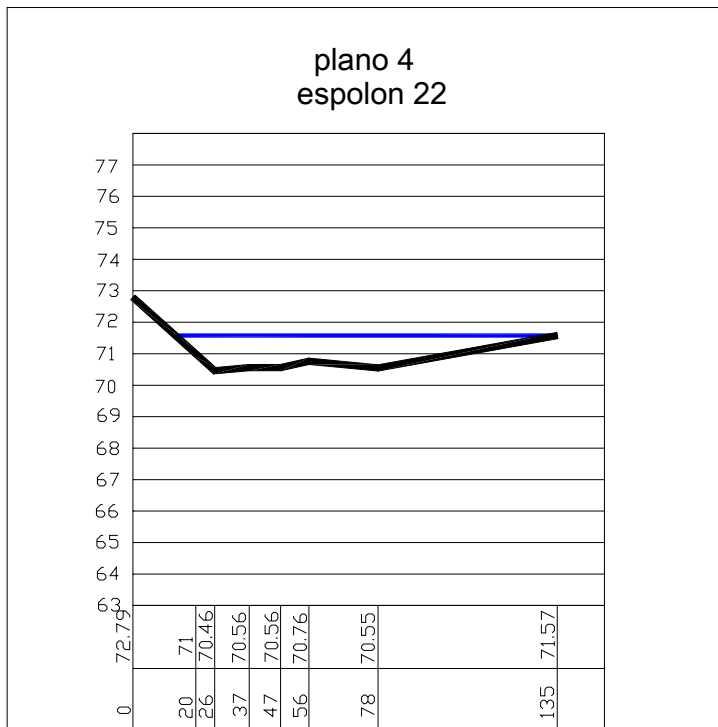
plano 4
espolon 18



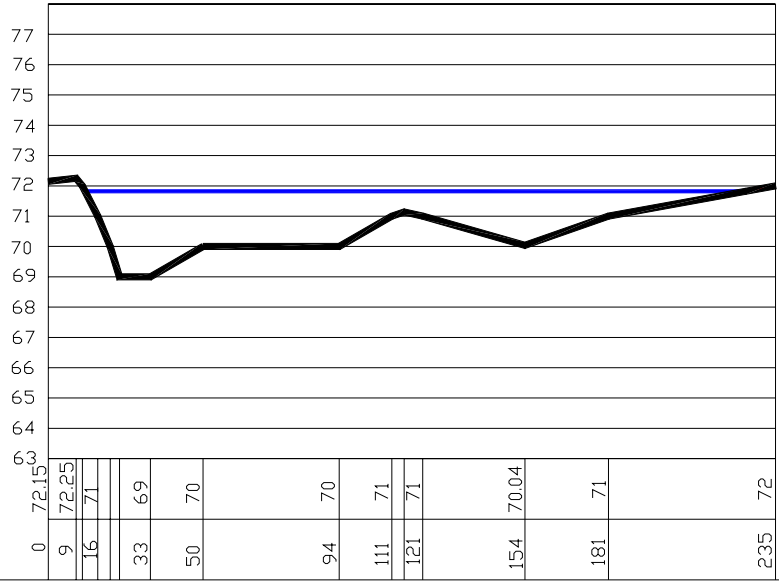
plano 4
espolon 2



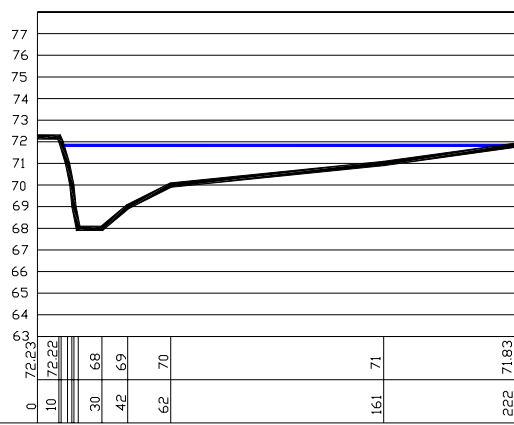
plano 4
espolon 22



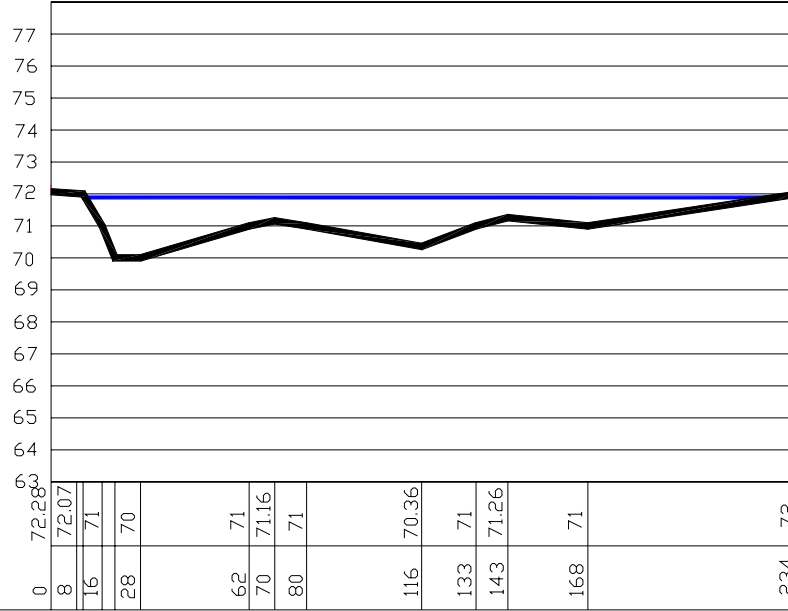
plano 4
espolon 7



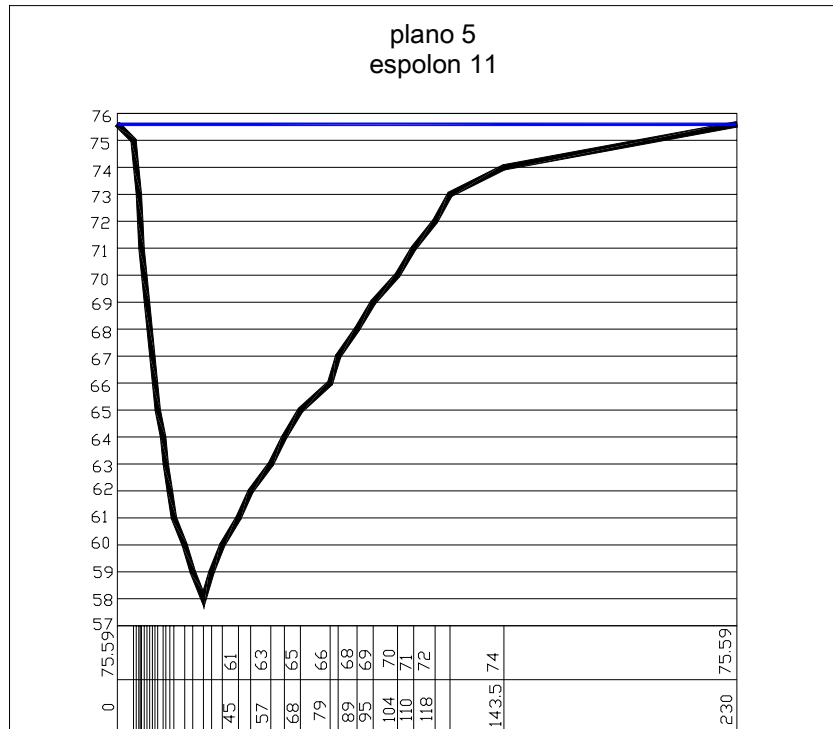
plano 4
espolon 8



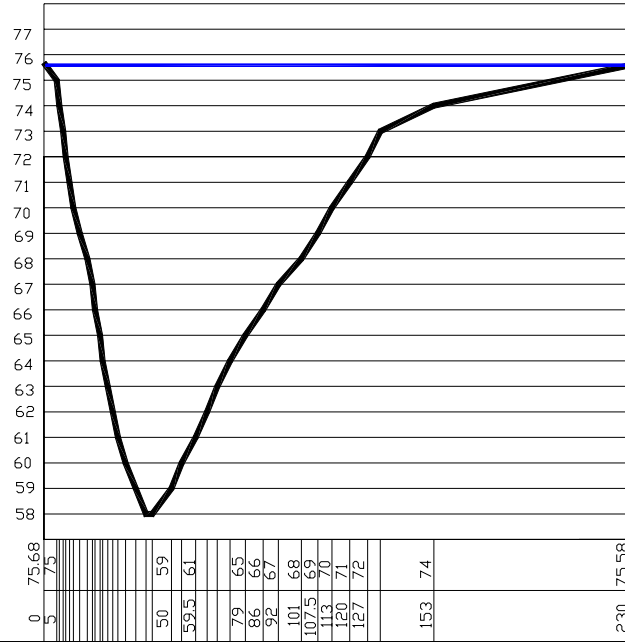
plano 4
espolon 9



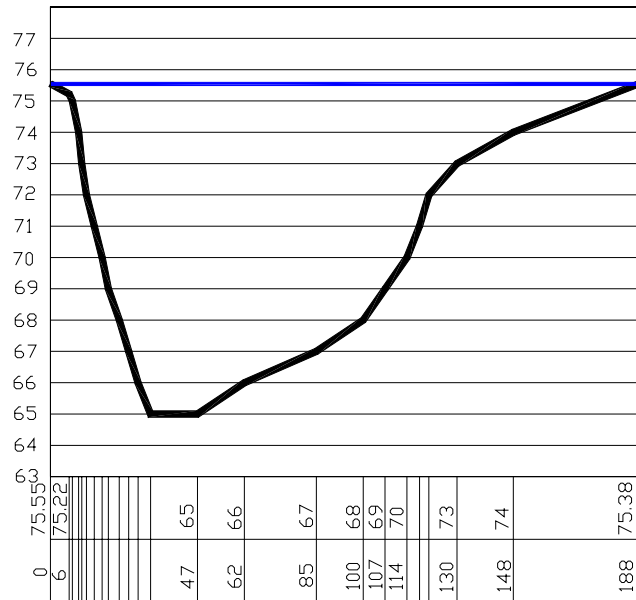
plano 5
espolon 11



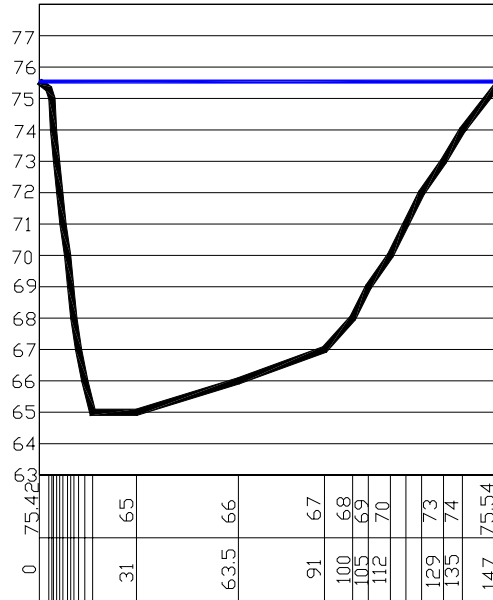
plano 5
 espolon 12



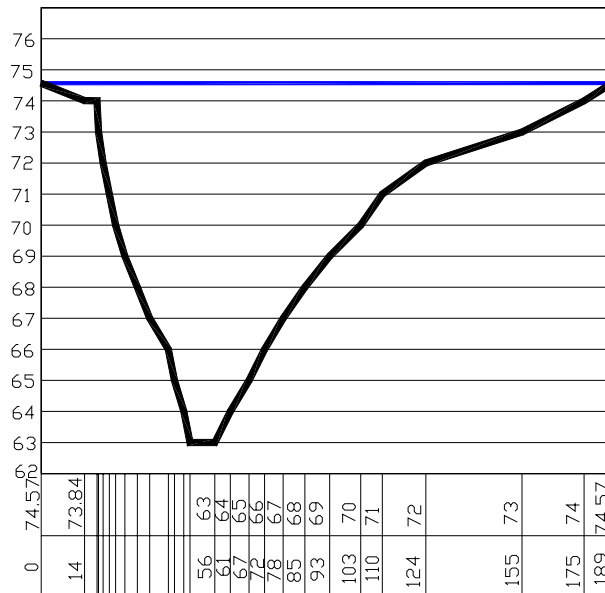
plano 5
 espolon 16



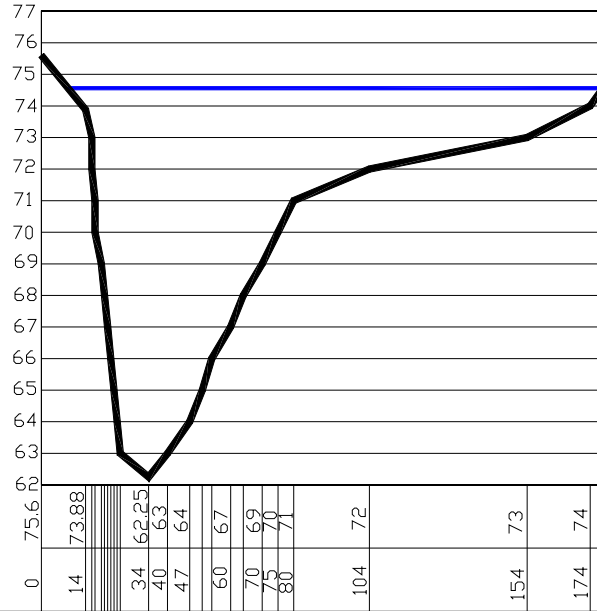
plano 5
espolon 17



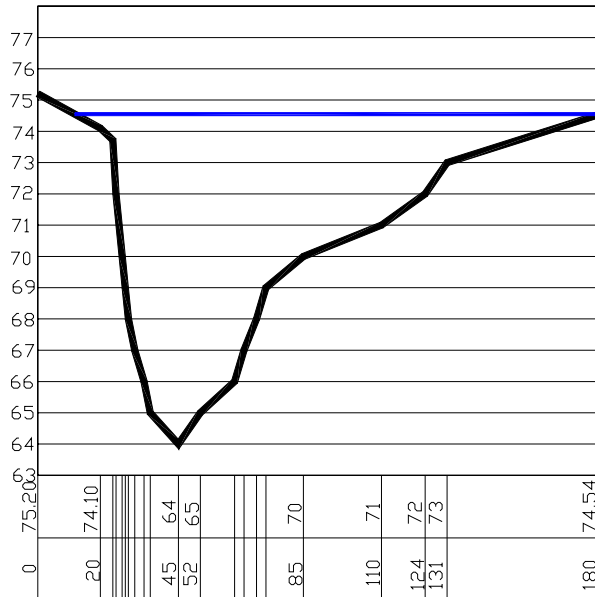
plano 6
espolon 11



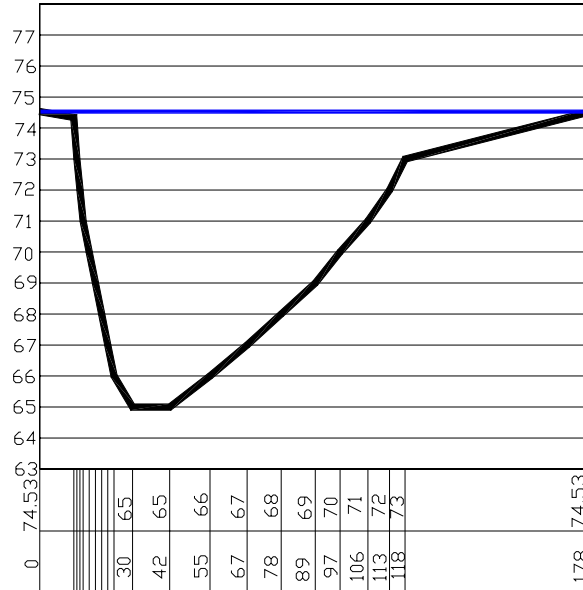
plano 6
espolon 12



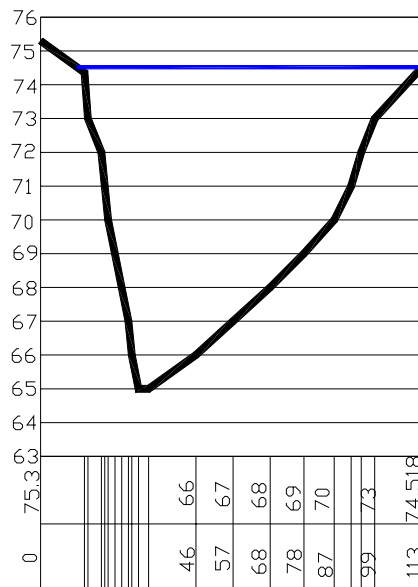
plano 6
espolon 13



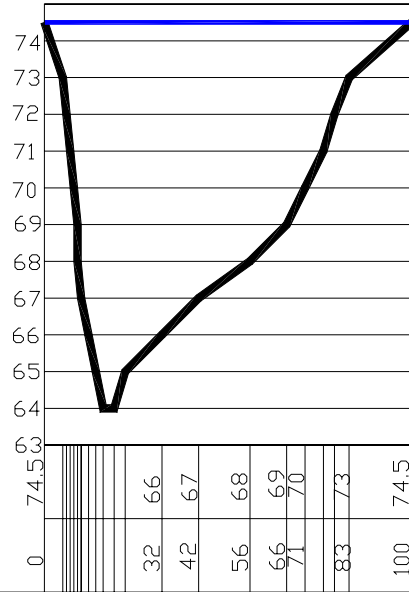
plano 6
espolon 14



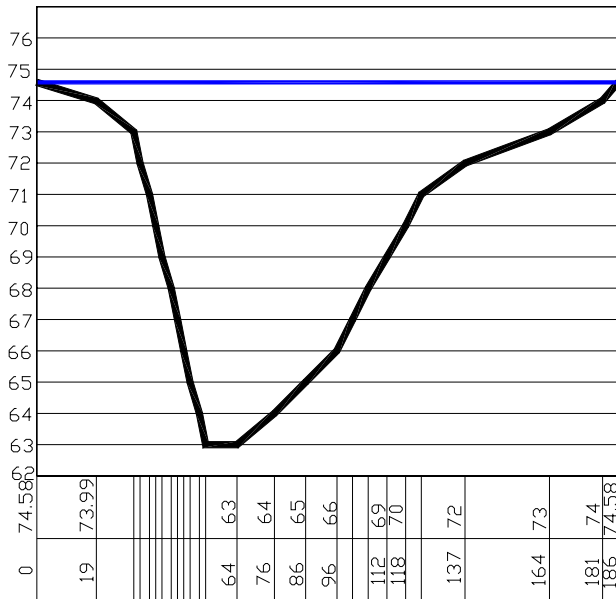
plano 6
esplon 15



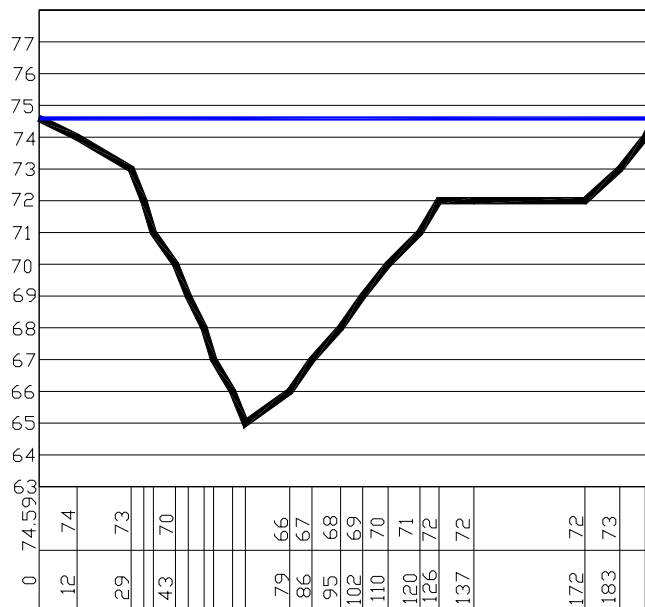
plano 6
 espolon 16



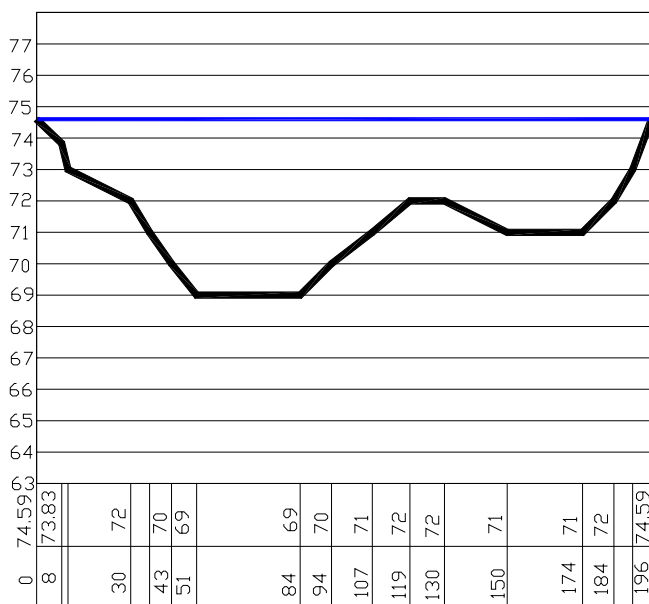
plano 6
 espolon 24

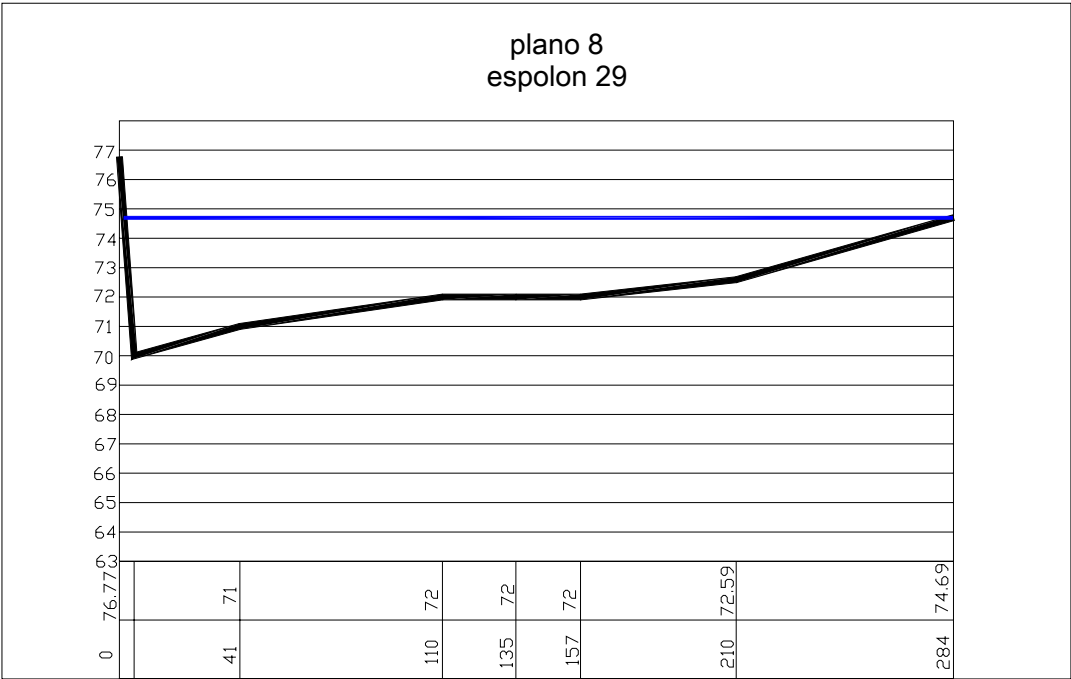
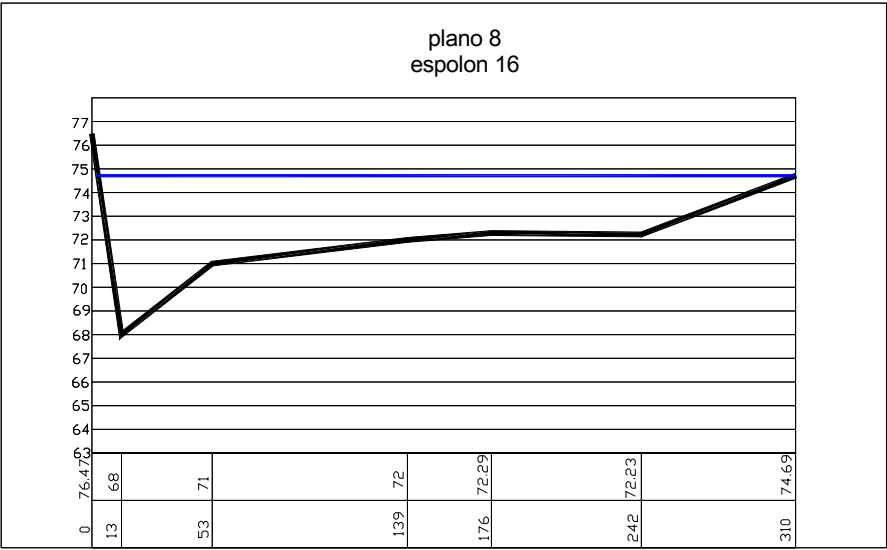


plano 6
espolon 25

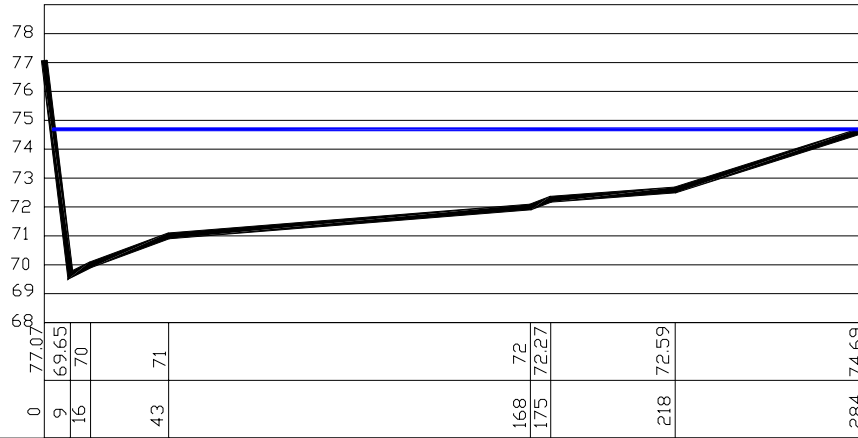


plano 6
espolon 26

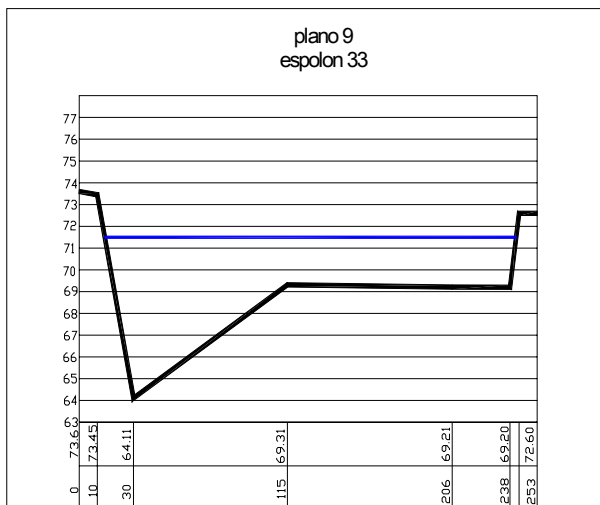




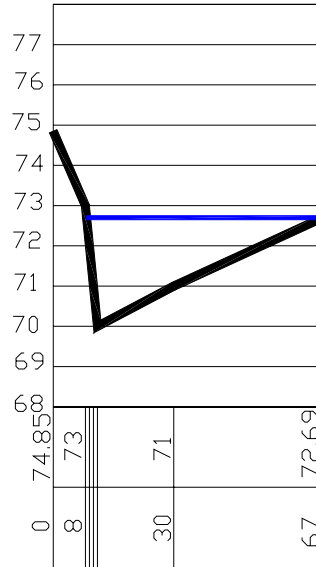
plano 8
 espolon 30



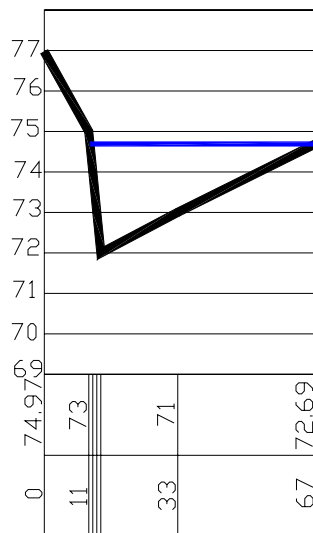
plano 9
 espolon 33



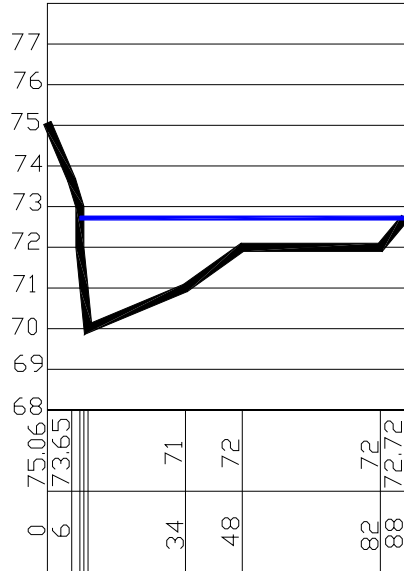
plano 10
espolon 12



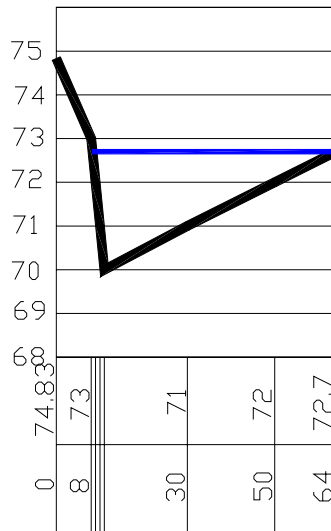
plano 10
espolon 13



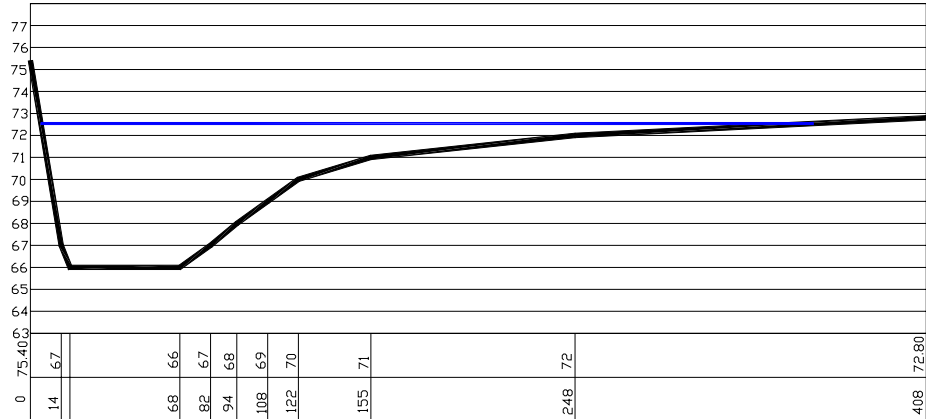
plano 10
espolon 25



plano 10
espolon 24



plano 10
espolon 27



Parámetros Hidráulicos

No. PLANO	FECHA	No. ESPOLON	PENDIENTE	NIVEL DEL AGUA	ÁREA	PERIMETRO	N MANNING	VELOCIDAD	CAUDAL	ANCHO	q caudal / ancho	No. FROUDE
PLANO 1	Sep-90	1	0,000	70,533	205,58	127,797	0,03	0,635	130,6	164	0,796	0,181
		2	0,000	70,522	207,92	197,641	0,03	0,479	99,5	210	0,474	0,154
PLANO 2	Dic-91	10	0,000	72,238	262,17	197,063	0,03	0,554	145,2	196	0,741	0,153
PLANO 3	May-93	11	0,000	74,564	580,72	216,570	0,03	0,893	518,7	230	2,255	0,179
		12	0,000	74,555	658,17	229,760	0,03	0,933	614,3	230	2,671	0,176
		13	0,000	74,544	523,84	206,844	0,03	0,860	450,4	222	2,029	0,179
		14	0,000	74,532	619,18	223,156	0,03	0,914	565,8	234	2,418	0,179
		15	0,000	74,520	647,76	235,053	0,03	0,910	589,2	236	2,497	0,175
		16	0,000	74,512	609,94	183,707	0,03	1,030	628,2	186	3,377	0,182
PLANO 4	May-93	18	0,000	71,925	381,90	229,809	0,03	0,703	268,6	250	1,075	0,182
		9	0,000	71,890	201,77	216,324	0,03	0,479	96,6	234	0,413	0,165
		8	0,000	71,837	299,62	211,611	0,03	0,632	189,4	122	1,553	0,129
		7	0,000	71,820	287,74	213,848	0,03	0,611	175,8	235	0,748	0,176
		1	0,000	71,865	179,71	162,827	0,03	0,535	96,2	184	0,523	0,173
		2	0,000	71,879	270,75	210,574	0,03	0,593	160,5	241	0,666	0,179
		22	0,000	71,579	86,75	121,521	0,03	0,400	34,7	135	0,257	0,160
PLANO 5	Nov-93	11	0,000	75,596	1285,0	237,661	0,03	1,283	1648,5	230	7,167	0,173
		12	0,000	75,587	1396,0	235,216	0,03	1,365	1905,8	230	8,286	0,177
		16	0,000	75,544	1017,5	190,823	0,03	1,271	1293,3	188	6,879	0,174
		17	0,000	75,541	1046,8	151,489	0,03	1,511	1581,6	147	10,759	0,181
PLANO 6	Ene-94	26	0,000	74,599	687,06	196,940	0,03	1,103	757,6	196	3,866	0,188
		25	0,000	74,590	767,54	195,584	0,03	1,193	915,5	194	4,719	0,191
		24	0,000	74,582	892,08	188,910	0,03	1,349	1203,7	186	6,472	0,197
		11	0,000	74,572	821,24	187,243	0,03	1,285	1054,9	184	5,733	0,194

No. PLANO	FECHA	No. ESPOLON	PENDIENTE	NIVEL DEL AGUA	ÁREA	PERIMETRO	N MANNING	VELOCIDAD	CAUDAL	ANCHO	q caudal / ancho	No. FROUDE
		12	0,000	74,561	746,22	175,698	0,03	1,257	938,2	178	5,271	0,196
		13	0,000	74,549	668,08	172,269	0,03	1,183	790,6	180	4,392	0,196
		14	0,000	74,531	746,99	181,243	0,03	1,232	920,5	178	5,172	0,192
		15	0,000	74,519	551,67	105,887	0,03	1,441	794,8	113	7,034	0,208
		16	0,000	74,509	543,00	106,540	0,03	1,420	770,9	100	7,709	0,195
PLANO 8	Oct-95	16	0,000	74,710	858,50	309,456	0,03	0,901	773,9	310	2,497	0,173
		29	0,000	74,699	712,10	284,895	0,03	0,841	598,8	284	2,109	0,170
		30	0,000	74,693	745,71	282,994	0,03	0,871	649,6	284	2,287	0,172
PLANO 9	Oct-95	33	0,000	71,500	746,74	229,500	0,03	1,003	748,7	253	2,959	0,186
PLANO 10	Jun-96	25	0,000	72,720	100,08	81,503	0,03	0,506	50,7	88	0,576	0,152
		24	0,000	72,710	74,35	56,887	0,03	0,528	39,2	64	0,613	0,156
		12	0,000	72,699	76,85	59,882	0,03	0,521	40,1	67	0,598	0,155
		13	0,000	72,639	73,96	56,873	0,03	0,526	38,9	67	0,581	0,160
		27	0,000	72,543	815,01	353,587	0,03	0,770	627,9	408	1,539	0,174

Datos Planimetricos

No. Plano	fecha	Plano	Sector	No. Espolón	Coordenadas		Longitud	Ancho	Angulo	Separación
					norte	este				
1	Sep-90	Batimetría	Puerto Pinto a	1	1271240	1020550	12	164	90	70
		Esc 1:2000	Puerto Carmelitas	2	1271300	1020536	11	210	90	125
				3	1271424	1020525	12		90	65
				4	1271485	1020520	11		80	66
				5	1271552	1020510	11		90	160
				6	1271700	1020480	12		90	
2	Dic-91	Batimetría	Puerto Casabe	10	1270240	1020648	25	196	87	200
		Esc 1:2000		19	1270438	1020612	8		95	132
				18	1270568	1020604	20		78	157
				9	1270725	1020590	17		88	236
				8	1270960	1020574	11		85	80
				7	1271040	1020574	9		65	198
				1	1271240	1020550	8		90	62
				2	1271300	1020536	12		90	117
				3	1271424	1020525	20		70	70
				4	1271485	1020520	8		90	58
3	May-93	Batimetría	Puerto Carmelitas	11	1265345	1019610	11	230	78	46
		Esc 1:2000	y Curva de Areneros	12	1265370	1019650	16	230	90	56
				13	1265385	1019710	15	222	77	67
				14	1265395	1019790	13	234	95	62
				15	1265360	1019850	13	236	107	42
				16	1265370	1019880	10	186	86	34
				17	1265360	1019915	7		90	
4	May-93	Batimetría	Pto.Pinto a Pto. Casabe	19	1270438	1020612	12		103	150

No. Plano	fecha	Plano	Sector	No. Espolón	Coordenadas		Longitud	Ancho	Angulo	Separación
					norte	este				
4	May-93	Batimetría	Puerto Pinto a	18	1270568	1020604	17	250	83	154
		Esc 1:2000	Puerto Casabe	9	1270725	1020590	12	234	88	234
				8	1270960	1020574	11	122	90	77
				7	1271040	1020574	9	235	90	198
				1	1271240	1020550	9	184	85	61
				2	1271300	1020536	12	241	75	126
				3	1271424	1020525	11		92	60
				4	1271485	1020520	11		90	61
				5	1271552	1020510	12		75	157
				6	1271700	1020480	16		65	166
				20	1271858	1020470	20		80	118
				21	1271980	1020455	19		65	120
				22	1272100	1020450	20	135	70	160
				23	1272260	1020444			75	
5	Nov-93	Batimetría	Puerto Carmelitas	11	1265345	1019610	6	230	90	43
		Esc 1:2000		12	1265370	1019650	5	230	90	230
				16	1265370	1019880	6	188	88	30
				17	1265360	1019915	3	147	90	
6	Ene-94	Batimetría	Puerto Carmelitas	26	1265293	1019490	8	196	90	40
		Esc 1:2000	y Curva de Areneros	25	1265318	1019520	12	194	90	43
				24	1265328	1019580	19	186	75	42
				11	1265345	1019610	14	184	90	48
				12	1265370	1019650	14	178	90	60
				13	1265385	1019710	20	180	75	78
				14	1265395	1019790	11	178	95	63
				15	1265360	1019850	13	113	75	45
				16	1265370	1019880	5	100	96	30

No. Plano	fecha	Plano	Sector	No. Espolón	Coordenadas		Longitud	Ancho	Angulo	Separación
					norte	este				
6				17	1265360	1019915	9		90	
				27	1265830	1020600	13		60	solo
7	Dic-94	Batimetría Esc 1:2000	Puerto Carmelitas a Puerto Pinto	28	1265348	1019574	9	55	95	137
				13	1265385	1019710	12	61	95	164
				14	1265395	1019790	7	50	90	55
				15	1265360	1019850	9	47	85	40
				16	1265370	1019880	12			65
				29	1265375	1019950	10	710	90	43
				30	1265385	1019980	14	646	85	
				27	1265830	1020600	16	282	67	solo
8	Oct-95	Batimetría Esc 1:2000	Puerto Carmelitas a Puerto Pinto	16	1265370	1019880	13	310	50	65
				29	1265375	1019950	5	284	93	45
				30	1265385	1019980	9	284	104	
				27	1265830	1020600	14		88	solo
9	Oct-95	Batimetría Esc 1:2000	Puerto Casbe a Galan	31	1272600	1020157	7		102	155
				32	1272752	1020185	8		114	150
				33	1272882	1020254	10	253	97	473
				34	1273350	1020180	12		87	
10	Jun-96	Batimetría Esc 1:2000	Puerto Carmelitas	25	1265314	1019550	6	88	94	60
				24	1265332	1019610	8	64	110	60
				12	1265350	1019666	8	67	117	47
				13	1265362	1019710	11	67	95	248
				29	1265358	1019958	14		112	48
				30	1265370	1019998	6		114	
				27	1265830	1020600	14	408	76	solo

Fuerza Tractiva

Plano	Fecha	No. Espolón	Velocidad	Área	Perímetro	Pendiente	Esfuerzo Cortante
Plano 1	Sep-90	1	0,635	205,58	127,797	0,000193	0,0003095
		2	0,479	207,92	197,641	0,000193	0,0002024
Plano 2	Dic-91	10	0,554	262,17	197,063	0,000189	0,0002505
Plano 3	May-93	11	0,893	580,72	216,570	0,000193	0,0005158
		12	0,933	658,17	229,760	0,000193	0,0005511
		13	0,860	523,84	206,844	0,000193	0,0004872
		14	0,914	619,18	223,156	0,000193	0,0005338
		15	0,910	647,76	235,053	0,000193	0,0005301
		16	1,030	609,94	183,707	0,000193	0,0006387
Plano 4	May-93	18	0,703	381,90	229,809	0,000226	0,0003753
		9	0,479	201,77	216,324	0,000226	0,0002106
		8	0,632	299,62	211,611	0,000226	0,0003198
		7	0,611	287,74	213,848	0,000226	0,0003039
		1	0,535	179,71	162,827	0,000226	0,0002493
		2	0,593	270,75	210,574	0,000226	0,0002904
		22	0,400	86,75	121,521	0,000226	0,0001612
		11	1,283	1285,0	237,661	0,000156	0,0008425
Plano 5	Nov-93	12	1,365	1396,0	235,216	0,000156	0,0009247
		16	1,271	1017,5	190,823	0,000156	0,0008308
		17	1,511	1046,8	151,489	0,000156	0,0010767
		26	1,103	687,06	196,940	0,000207	0,0007203
Plano 6	Ene-94	25	1,193	767,54	195,584	0,000207	0,0008102
		24	1,349	892,08	188,910	0,000207	0,0009750

Plano	Fecha	No. Espolón	Velocidad	Área	Perímetro	Pendiente	Esfuerzo Cortante
		11	1,285	821,24	187,243	0,000207	0,0009056
Plano 6		12	1,257	746,22	175,698	0,000207	0,0008769
		13	1,183	668,08	172,269	0,000207	0,0008007
		14	1,232	746,99	181,243	0,000207	0,0008509
		15	1,441	551,67	105,887	0,000207	0,0010757
		16	1,420	543,00	106,540	0,000207	0,0010523
Plano 8	Oct-95	16	0,901	858,50	309,456	0,000188	0,0005196
		29	0,841	712,10	284,895	0,000188	0,0004681
		30	0,871	745,71	282,994	0,000188	0,0004935
Plano 9	Oct-95	33	1,003	746,74	229,500	0,000188	0,0006094
Plano 10	Jun-96	25	0,506	100,08	81,503	0,000175	0,0002151
		24	0,528	74,35	56,887	0,000175	0,0002289
		12	0,521	76,85	59,882	0,000175	0,0002248
		13	0,526	73,96	56,873	0,000175	0,0002278
		27	0,770	815,01	353,587	0,000175	0,0004037

Resistencia a la fuerza tractiva

ton/m2							
d50=0,0004m		d50=0,0005m		d50=0,0006m		d50=0,0007m	
0,000042	1,41E-05	5,25E-05	1,76E-05	0,000063	2,12E-05	7,35E-05	2,5E-05

Velocidades críticas

PLANO	FECHA	No. ESPOLON	PENDIENTE	NIVEL DEL AGUA h	Vc FHWA				VELOCIDAD MANNING
					D50=0,4 mm	D50=0,5 mm	D50=0,6 mm	D50=0,7 mm	
Plano 1	Sep-90	1	0,0001927	2,08	0,912	0,982	1,043	1,098	0,635
		2	0,0001927	1,32	0,845	0,910	0,967	1,018	0,479
Plano 2	Dic-91	10	0,0001886	2,237	0,923	0,994	1,056	1,112	0,554
Plano 3	May-93	11	0,0001927	4,239	1,026	1,106	1,175	1,237	0,893
		12	0,0001927	4,451	1,035	1,115	1,185	1,247	0,933
		13	0,0001927	4,441	1,034	1,114	1,184	1,246	0,860
		14	0,0001927	4,429	1,034	1,114	1,184	1,246	0,914
		15	0,0001927	4,418	1,033	1,113	1,183	1,245	0,910
		16	0,0001927	4,410	1,033	1,113	1,183	1,245	1,030
Plano 4	May-93	18	0,0002262	1,925	0,900	0,969	1,030	1,084	0,703
		9	0,0002262	1,890	0,897	0,966	1,027	1,081	0,479
		8	0,0002262	1,837	0,893	0,962	1,022	1,076	0,632
		7	0,0002262	1,820	0,891	0,960	1,020	1,074	0,611
		1	0,0002262	2,865	0,962	1,036	1,101	1,159	0,535
		2	0,0002262	2,879	0,962	1,037	1,102	1,160	0,593
		22	0,0002262	1,180	0,829	0,893	0,949	0,999	0,400
Plano 5	Nov-93	11	0,0001561	5,596	1,075	1,158	1,231	1,295	1,283
		12	0,0001561	5,588	1,075	1,158	1,230	1,295	1,365
		16	0,0001561	5,545	1,073	1,156	1,229	1,293	1,271
		17	0,0001561	5,541	1,073	1,156	1,229	1,293	1,511
Plano 6	Ene-94	26	0,0002068	4,599	1,040	1,121	1,191	1,254	1,103
		25	0,0002068	4,590	1,040	1,120	1,191	1,253	1,193
		24	0,0002068	4,582	1,040	1,120	1,190	1,253	1,349

		11	0,0002068	4,572	1,039	1,120	1,190	1,253	1,285
					D50=0,4 mm	D50=0,5 mm	D50=0,6 mm	D50=0,7 mm	
Plano 6		12	0,0002068	4,561	1,039	1,119	1,189	1,252	1,257
		13	0,0002068	4,549	1,039	1,119	1,189	1,251	1,183
		14	0,0002068	4,531	1,038	1,118	1,188	1,251	1,232
		15	0,0002068	4,519	1,037	1,117	1,188	1,250	1,441
		16	0,0002068	4,509	1,037	1,117	1,187	1,250	1,420
Plano 8	Oct-95	16	0,0001876	4,710	1,045	1,125	1,196	1,259	0,901
		29	0,0001876	4,590	1,044	1,125	1,195	1,258	0,841
		30	0,0001876	4,693	1,044	1,125	1,195	1,258	0,871
Plano 9	Oct-95	33	0,0001876	3,500	0,994	1,071	1,138	1,198	1,003
Plano 10	Jun-96	25	0,0001755	2,720	0,953	1,027	1,091	1,149	0,506
		24	0,0001755	2,700	0,952	1,026	1,090	1,147	0,528
		12	0,0001755	2,699	0,952	1,026	1,090	1,147	0,521
		13	0,0001755	2,690	0,951	1,025	1,089	1,147	0,526
		27	0,0001755	5,543	1,073	1,156	1,229	1,293	0,770

Ecuación No. 1

Autor Koshla

Plano	Fecha	No. Espolón	q caudal / ancho	Coeficiente de Lacey				Nivel de agua h	Z				Z Medida en Plano	% Error
				d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	0,79638	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	-	-	-	-	-	
		2	0,47392	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	-	-	-	-	-	
Plano 2	Dic-91	10	0,74068	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	2,237	0,000	0,000	0,000	0,000	2,83	100
Plano 3	May-93	11	2,25502	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	-	-	-	-	-	
		12	2,67089	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,451	0,000	0,000	0,000	0,000	2	100
		13	2,02874	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,441	0,000	0,000	0,000	0,000	2	100
		14	2,41774	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,429	0,000	0,000	0,000	0,000	3	100
		15	2,49651	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,418	0,000	0,000	0,000	0,000	4	100
		16	3,37718	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,410	0,000	0,000	0,000	0,000	4,74	100
Plano 4	May-93	18	1,07458	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,925	0,000	0,000	0,000	0,000	0,62	-100
		9	0,41269	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,890	0,000	0,000	0,000	0,000	0,5	100
		8	1,55261	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,837	0,000	0,000	0,000	0,000	2	100
		7	0,74820	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,820	0,000	0,000	0,000	0,000	1	100
		1	0,52298	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	2,865	0,000	0,000	0,000	0,000	0,35	100
		2	0,66604	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	2,879	0,000	0,000	0,000	0,000	2	100
		22	0,25734	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	-	-	-	-	-	
		11	7,16749	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,596	0,000	0,000	0,000	0,000	12	100
Plano 5	Nov-93	12	8,28590	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,588	0,000	0,000	0,000	0,000	12	100
		16	6,87932	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,545	0,000	0,000	0,000	0,000	5	100
		17	10,75925	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,541	0,000	0,000	0,000	0,000	5	-100
		26	3,86554	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,599	0,000	0,000	0,000	0,000	1	-100
Plano 6	Ene-94	25	4,71885	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,590	0,000	0,000	0,000	0,000	5	100

		24	6,47166	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,582	0,000	0,000	0,000	0,000	7	100
		11	5,73308	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,572	0,000	0,000	0,000	0,000	7	100
Plano 6		12	5,27077	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,561	0,000	0,000	0,000	0,000	7,75	100
		13	4,39203	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,549	0,000	0,000	0,000	0,000	6	100
		14	5,17157	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,531	0,000	0,000	0,000	0,000	5	100
		15	7,03369	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,519	0,000	0,000	0,000	0,000	5	100
		16	7,70940	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,509	0,000	0,000	0,000	0,000	6	100
Plano 8	Oct-95	16	2,49655	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,710	0,000	0,000	0,000	0,000	2	100
		29	2,10860	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
		30	2,28722	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,693	0,000	0,000	0,000	0,000	0,35	100
Plano 9	Oct-95	33	2,95920	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	3,500	0,000	0,000	0,000	0,000	4	100
Plano 10	Jun-96	25	0,57581	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
		24	0,61310	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
		12	0,59815	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
		13	0,58067	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
		27	1,53903	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,543	0,000	0,000	0,000	0,000	1	100

Ecuación No.1

Autor Koshla + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	q caudal/ancho	Coeficiente de Lacey				Nivel de agua h	Z				Z Contracción	Z Medida en Plano	% Error	
				d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm				
Plano 1	Sep-90	1	0,79638	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	0,47392	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	0,74068	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	2,237	0,000	0,000	0,000	0,000	0,317	2,83	88,8	
Plano 3	May-93	11	2,25502	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
		12	2,67089	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,451	0,000	0,000	0,000	0,000	0,289	2	85,6	
		13	2,02874	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,441	0,000	0,000	0,000	0,000	0,469	2	76,6	
		14	2,41774	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,429	0,000	0,000	0,000	0,000	0,612	3	79,6	
		15	2,49651	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,418	0,000	0,000	0,000	0,000	0,279	4	93,0	
		16	3,37718	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,410	0,000	0,000	0,000	0,000	0,172	4,74	96,4	
Plano 4	May-93	18	1,07458	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,925	0,000	0,000	0,000	0,000	0,084	0,62	86,4	
		9	0,41269	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,890	0,000	0,000	0,000	0,000	0,153	0,5	69,5	
		8	1,55261	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,837	0,000	0,000	0,000	0,000	0,388	2	80,6	
		7	0,74820	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	1,820	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214	1	78,6	
		1	0,52298	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	2,865	0,000	0,000	0,000	0,000	0,527	0,35	50,5	
		2	0,66604	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	2,879	0,000	0,000	0,000	0,000	0,131	2	93,5	
		22	0,25734	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	
Plano 5	Nov-93	11	7,16749	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,596	0,000	0,000	0,000	0,000	0,267	12	97,8	
		12	8,28590	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,588	0,000	0,000	0,000	0,000	0,362	12	97,0	
		16	6,87932	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,545	0,000	0,000	0,000	0,000	0,213	5	95,7	
		17	10,75925	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,541	0,000	0,000	0,000	0,000	0,277	5	94,5	
Plano 6	Ene-94	26	3,86554	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,599	0,000	0,000	0,000	0,000	0,135	1	86,5	
		25	4,71885	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,590	0,000	0,000	0,000	0,000	0,208	5	95,8	
		24	6,47166	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,582	0,000	0,000	0,000	0,000	0,180	7	97,4	

		11	5,73308	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,572	0,000	0,000	0,000	0,000	0,279	7	96,0
Plano 6		12	5,27077	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,561	0,000	0,000	0,000	0,000	0,395	7,75	94,9
		13	4,39203	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,549	0,000	0,000	0,000	0,000	0,615	6	89,8
		14	5,17157	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,531	0,000	0,000	0,000	0,000	0,875	5	82,5
		15	7,03369	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,519	0,000	0,000	0,000	0,000	0,659	5	86,8
		16	7,70940	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,509	0,000	0,000	0,000	0,000	0,343	6	94,3
Plano 8	Oct-95	16	2,49655	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,710	0,000	0,000	0,000	0,000	0,108	2	94,6
		29	2,10860	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
		30	2,28722	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	4,693	0,000	0,000	0,000	0,000	0,167	0,35	52,4
Plano 9	Oct-95	33	2,95920	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	3,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,099	4	97,5
Plano 10	Jun-96	25	0,57581	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
		24	0,61310	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
		12	0,59815	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
		13	0,58067	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	-	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-
		27	1,53903	0,03520	0,03935	0,04311	0,04657	5,543	0,000	0,000	0,000	0,000	0,155	1	84,5

Ecuación No. 2

Autor: Ahmad

Plano	Fecha	No. Espolón	q =caudal / ancho	k"	Nivel de agua h	Z	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	0,796	1,425	-	-	-	-
		2	0,474	1,425	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	0,741	1,55	2,230	0,000	2,83	100,000
Plano 3	May-93	11	2,255	1,75	-	-	-	-
		12	2,671	1,75	4,451	0,000	2	100,000
		13	2,029	1,75	4,441	0,000	2	100,000
		14	2,418	1,75	4,429	0,000	3	100,000
		15	2,497	1,75	4,418	0,000	4	100,000
		16	3,377	1,75	4,410	0,000	4,74	100,000
Plano 4	May-93	18	1,075	1,4	1,925	0,000	0,62	100,000
		9	0,413	1,425	1,890	0,000	0,5	100,000
		8	1,553	1,31	1,837	0,000	2	100,000
		7	0,748	1,45	1,820	0,000	1	100,000
		1	0,523	1,425	2,865	0,000	0,35	100,000
		2	0,666	1,425	2,879	0,000	2	100,000
		22	0,257	1,425	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	7,167	1,75	5,596	0,910	12	92,419
		12	8,286	1,75	5,588	1,578	12	86,848
		16	6,879	1,75	5,545	0,785	5	84,293
		17	10,759	1,75	5,541	2,988	5	40,237
Plano 6	Ene-94	26	3,866	1,75	4,599	0,000	1	100,000
		25	4,719	1,75	4,590	0,333	5	93,338
		24	6,472	1,75	4,582	1,495	7	78,638
		11	5,733	1,75	4,572	1,034	7	85,228

		12	5,271	1,75	4,561	0,739	7,75	90,462
Plano 6		13	4,392	1,75	4,549	0,145	6	97,586
		14	5,172	1,75	4,531	0,702	5	85,954
		15	7,034	1,75	4,519	1,905	5	61,892
		16	7,709	1,75	4,509	2,321	6	61,323
Plano 8	Oct-95	16	2,497	1,2	4,710	0,000	2	100,000
		29	2,109	1,5	-	-	-	-
		30	2,287	1,5	4,693	0,000	0,35	100,000
Plano 9	Oct-95	33	2,959	1,5	3,500	0,000	4	100,000
Plano 10	Jun-96	25	0,576	1,5	-	-	-	-
		24	0,613	1,5	-	-	-	-
		12	0,598	1,5	-	-	-	-
		13	0,581	1,45	-	-	-	-
		27	1,539	1,5	5,543	0,000	1	100,000

Ecuación No. 2

Autor: Ahmad + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	q =caudal / ancho	k"	Nivel de agua h	Z	Z Contracción	Z Total	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	0,796	1,425	-	-	-	-	-	-
		2	0,474	1,425	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	0,741	1,55	2,230	0,000	0,317	0,317	2,83	88,799
Plano 3	May-93	11	2,255	1,75	-	-	-	-	-	-
		12	2,671	1,75	4,451	0,000	0,289	0,289	2	85,568
		13	2,029	1,75	4,441	0,000	0,469	0,469	2	76,570
		14	2,418	1,75	4,429	0,000	0,612	0,612	3	79,589
		15	2,497	1,75	4,418	0,000	0,279	0,279	4	93,036
Plano 4	May-93	16	3,377	1,75	4,410	0,000	0,172	0,172	4,74	96,370
		18	1,075	1,4	1,925	0,000	0,084	0,084	0,62	86,405
		9	0,413	1,425	1,890	0,000	0,153	0,153	0,5	69,461
		8	1,553	1,31	1,837	0,000	0,388	0,388	2	80,602
		7	0,748	1,45	1,820	0,000	0,214	0,214	1	78,572
		1	0,523	1,425	2,865	0,000	0,527	0,527	0,35	-50,525
Plano 5	Nov-93	2	0,666	1,425	2,879	0,000	0,131	0,131	2	93,459
		22	0,257	1,425	-	-	0,000	-	-	-
		11	7,167	1,75	5,596	0,910	0,267	1,176	12	90,197
		12	8,286	1,75	5,588	1,578	0,362	1,941	12	83,827
		16	6,879	1,75	5,545	0,785	0,213	0,999	5	80,028
Plano 6	Ene-94	17	10,759	1,75	5,541	2,988	0,277	3,265	5	34,699
		26	3,866	1,75	4,599	0,000	0,135	0,135	1	86,493
		25	4,719	1,75	4,590	0,333	0,208	0,541	5	89,171
		24	6,472	1,75	4,582	1,495	0,180	1,675	7	76,067
		11	5,733	1,75	4,572	1,034	0,279	1,313	7	81,246

		12	5,271	1,75	4,561	0,739	0,395	1,134	7,75	85,370
Plano 6		13	4,392	1,75	4,549	0,145	0,615	0,760	6	87,336
		14	5,172	1,75	4,531	0,702	0,875	1,577	5	68,453
		15	7,034	1,75	4,519	1,905	0,659	2,565	5	48,708
		16	7,709	1,75	4,509	2,321	0,343	2,664	6	55,606
Plano 8	Oct-95	16	2,497	1,2	4,710	0,000	0,108	0,108	2	94,608
		29	2,109	1,5	-	-	0,000	-	-	-
		30	2,287	1,5	4,693	0,000	0,167	0,167	0,35	52,414
Plano 9	Oct-95	33	2,959	1,5	3,500	0,000	0,099	0,099	4	97,516
Plano 10	Jun-96	25	0,576	1,5	-	-	0,000	-	-	-
		24	0,613	1,5	-	-	0,000	-	-	-
		12	0,598	1,5	-	-	0,000	-	-	-
		13	0,581	1,45	-	-	0,000	-	-	-
		27	1,539	1,5	5,543	0,000	0,155	0,155	1	84,474

Ecuación No. 3

Autor: Altunin

Plano	Fecha	No. Espolón	α	$k\alpha$	Km	N=L/B	kn	Z	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	90	1	0,94	0,0732	-	-	-	-
		2	90	1	0,94	0,0524	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	87	1	0,94	0,1276	2,2000	2,6760	2,830	5,442
Plano 3	May-93	11	78	0,985	0,94	0,0478	-	-	-	-
		12	90	1	0,94	0,0696	-	-	2,000	-
		13	77	0,98	0,94	0,0676	-	-	2,000	-
		14	95	1,01	0,94	0,0556	-	-	3,000	-
		15	107	1,035	0,94	0,0551	-	-	4,000	-
		16	86	1	0,94	0,0538	-	-	4,740	-
Plano 4	May-93	18	83	0,99	0,94	0,0680	-	-	0,620	-
		9	88	1	0,94	0,0513	-	-	0,500	-
		8	90	1	0,94	0,0902	-	-	2,000	-
		7	90	1	0,94	0,0383	-	-	1,000	-
		1	85	1	0,94	0,0489	-	-	0,350	-
		2	75	0,98	0,94	0,0498	-	-	2,000	-
		22	70	0,97	0,94	0,1481	2,3600	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	90	1	0,94	0,0261	-	-	12,000	-
		12	90	1	0,94	0,0217	-	-	12,000	-
		16	88	1	0,94	0,0319	-	-	5,000	-
		17	90	1	0,94	0,0204	-	-	5,000	-
Plano 6	Ene-94	26	90	1	0,94	0,0408	-	-	1,000	-
		25	90	1	0,94	0,0619	-	-	5,000	-
		24	75	0,98	0,94	0,1022	2,0000	4,3987	7,000	37,161
		11	90	1	0,94	0,0761	-	-	7,000	-

		12	90	1	0,94	0,0787	-	-	7,750	-
Plano 6		13	75	0,98	0,94	0,1111	2,1000	4,8123	6,000	19,795
		14	95	1,01	0,94	0,0618	-	-	5,000	-
		15	75	0,98	0,94	0,1150	2,1500	5,0025	5,000	0,049
		16	96	1,01	0,94	0,0500	-	-	6,000	-
Plano 8	Oct-95	16	50	0,91	0,94	0,0419	-	-	2,000	-
		29	93	1	0,94	0,0176	-	-	-	-
		30	104	1,03	0,94	0,0317	-	-	0,350	-
Plano 9	Oct-95	33	97	1,015	0,94	0,0395	-	-	4,000	-
Plano 10	Jun-96	25	94	1,08	0,94	0,0682	-	-	-	-
		24	110	1,04	0,94	0,1250	2,2000	-	-	-
		12	117	1,06	0,94	0,1194	2,1600	-	-	-
		13	95	1,01	0,94	0,1642	2,4200	-	-	-
		27	76	1	0,94	0,0343	-	-	1,000	-

Ecuación No.3

Autor: Altunin + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	α	$k\alpha$	Km	N=L/B	kn	Z	Z Contracción	Z Total	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	90	1	0,94	0,0732	-	-	-	-	-	-
		2	90	1	0,94	0,0524	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	87	1	0,94	0,1276	2,2000	2,6760	0,3169	2,9929	2,830	5,757
Plano 3	May-93	11	78	0,985	0,94	0,0478	-	-	-	-	-	-
		12	90	1	0,94	0,0696	-	-	0,2886	-	2,000	-
		13	77	0,98	0,94	0,0676	-	-	0,4686	-	2,000	-
		14	95	1,01	0,94	0,0556	-	-	0,6123	-	3,000	-
		15	107	1,035	0,94	0,0551	-	-	0,2786	-	4,000	-
		16	86	1	0,94	0,0538	-	-	0,1721	-	4,740	-
Plano 4	May-93	18	83	0,99	0,94	0,0680	-	-	0,0843	-	0,620	-
		9	88	1	0,94	0,0513	-	-	0,1527	-	0,500	-
		8	90	1	0,94	0,0902	-	-	0,3880	-	2,000	-
		7	90	1	0,94	0,0383	-	-	0,2143	-	1,000	-
		1	85	1	0,94	0,0489	-	-	0,5268	-	0,350	-
		2	75	0,98	0,94	0,0498	-	-	0,1308	-	2,000	-
		22	70	0,97	0,94	0,1481	2,3600	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	90	1	0,94	0,0261	-	-	0,2666	-	12,000	-
		12	90	1	0,94	0,0217	-	-	0,3625	-	12,000	-
		16	88	1	0,94	0,0319	-	-	0,2133	-	5,000	-
		17	90	1	0,94	0,0204	-	-	0,2769	-	5,000	-
Plano 6	Ene-94	26	90	1	0,94	0,0408	-	-	0,1351	-	1,000	-
		25	90	1	0,94	0,0619	-	-	0,2084	-	5,000	-
		24	75	0,98	0,94	0,1022	2,0000	4,3987	0,1799	4,5787	7,000	34,590
		11	90	1	0,94	0,0761	-	-	0,2787	-	7,000	-

Plano	Fecha	No. Espolón	α	$k\alpha$	Km	N=L/B	kn	Z	Z Contracción	Z Total	Z Medida en plano	% Error
Plano 6		12	90	1	0,94	0,0787	-	-	0,3946	-	7,750	-
		13	75	0,98	0,94	0,1111	2,1000	4,8123	0,6150	5,4273	6,000	9,545
		14	95	1,01	0,94	0,0618	-	-	0,8751	-	5,000	-
		15	75	0,98	0,94	0,1150	2,1500	5,0025	0,6592	5,6617	5,000	13,234
		16	96	1,01	0,94	0,0500	-	-	0,3430	-	6,000	-
Plano 8	Oct-95	16	50	0,91	0,94	0,0419	-	-	0,1078	-	2,000	-
		29	93	1	0,94	0,0176	-	-	-	-	-	-
		30	104	1,03	0,94	0,0317	-	-	0,1665	-	0,350	-
Plano 9	Oct-95	33	97	1,015	0,94	0,0395	-	-	0,0993	-	4,000	-
Plano 10	Jun-96	25	94	1,08	0,94	0,0682	-	-	-	-	-	-
		24	110	1,04	0,94	0,1250	2,2000	-	-	-	-	-
		12	117	1,06	0,94	0,1194	2,1600	-	-	-	-	-
		13	95	1,01	0,94	0,1642	2,4200	-	-	-	-	-
		27	76	1	0,94	0,0343	-	-	0,1553	-	1,000	-

Ecuación No.4

Autor: Garde

Plano	Fecha	No. Espolón	n L/B	d50=0,4mm			d50=0,5mm			d50=0,6mm			d50=0,7mm			No. Froude	Z				Z Medida en plano	% Error
				Cd	f1	f2	Cd	f1	f2	Cd	f1	f2	Cd	f1	f2		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	0,244	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,181						
		2	0,071	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,154						
Plano 2	Dic-91	10	0,128	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,153	0,4870	0,3030	0,3112	0,1720	2,830	82,8
Plano 3	May-93	11	0,065	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,179	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
		12	0,087	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,176	1,2288	0,8894	0,9220	0,6493	2,000	38,6
		13	0,135	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,179	1,2773	0,9402	0,9747	0,7020	2,000	36,1
		14	0,171	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,179	1,2171	0,8854	0,9198	0,6511	3,000	59,4
		15	0,085	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,175	1,1119	0,7798	0,8111	0,5449	4,000	72,2
		16	0,054	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,182	1,2559	0,9270	0,9629	0,6948	4,740	73,5
Plano 4	May-93	18	0,060	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,182	0,5875	0,4417	0,4577	0,3388	0,620	5,2
		9	0,107	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,165	0,3531	0,2104	0,2204	0,1092	0,500	29,4
		8	0,246	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,129	0,0408	0,0000	0,0000	0,0000	2,000	98,0
		7	0,149	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,176	0,4285	0,2943	0,3072	0,1993	1,000	57,1
		1	0,217	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,173	0,6612	0,4469	0,4659	0,2952	0,350	15,7
		2	0,062	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,179	0,7568	0,5423	0,5642	0,3908	2,000	62,2
		22	0,333	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,160						
Plano 5	Nov-93	11	0,065	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,173	1,1394	0,7306	0,7672	0,4413	12,000	90,5
		12	0,087	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,177	1,2168	0,8118	0,8515	0,5254	12,000	89,9
		16	0,053	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,174	1,2038	0,7968	0,8343	0,5088	5,000	75,9
		17	0,068	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,181	1,3116	0,9120	0,9548	0,6299	5,000	73,8
Plano 6	Ene-94	26	0,041	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,188	1,3914	1,0555	1,0975	0,8189	1,000	5,5
		25	0,062	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,191	1,6089	1,2676	1,3132	1,0276	5,000	67,8

		24	0,054	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,197	2,0221	1,6687	1,7208	1,4207	7,000	71,1
		11	0,082	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,194	1,7656	1,4217	1,4701	1,1801	7,000	74,8
		12	0,112	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,196	1,8281	1,4850	1,5350	1,2442	7,750	76,4
Plano 6		13	0,167	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,196	2,0573	1,7027	1,7544	1,4538	6,000	65,7
		14	0,225	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,192	1,6031	1,2665	1,3120	1,0298	5,000	67,9
		15	0,177	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,208	2,3877	2,0403	2,1025	1,7980	5,000	52,2
		16	0,100	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,195	1,5796	1,2499	1,2966	1,0184	6,000	73,7
Plano 8	Oct-95	16	0,032	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,173	1,0441	0,6943	0,7253	0,4466	2,000	47,8
		29	0,049	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,170	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
		30	0,049	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,172	0,9458	0,6005	0,6301	0,3560	0,350	1,7
Plano 9	Oct-95	33	0,040	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,186	1,0201	0,7643	0,7952	0,5840	4,000	74,5
Plano 10	Jun-96	25	0,136	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,152	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
		24	0,156	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,156	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
		12	0,299	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,155	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
		13	0,448	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,160	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
		27	0,040	2,13	4,6	0,78	1,68	4,8	0,84	1,38	5	0,86	1,18	5	0,89	0,174	1,2081	0,8000	0,8373	0,5113	1,000	20,8

Ecuación No.4

Autor: Garde + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	n L / B	Z				Z Contracción	Z Total				Z Medida en plano	% Error
				d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		2	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Plano 2	Dic-91	10	0,13	0,4870	0,3030	0,3112	0,1720	0,3169	0,8039	0,6199	0,6282	0,4889	2,830	71,6
Plano 3	May-93	11	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		12	0,09	1,2288	0,8894	0,9220	0,6493	0,2886	1,5174	1,1780	1,2106	0,9379	2,000	24,1
		13	0,14	1,2773	0,9402	0,9747	0,7020	0,4686	1,7459	1,4088	1,4433	1,1706	2,000	12,7
		14	0,17	1,2171	0,8854	0,9198	0,6511	0,6123	1,8295	1,4977	1,5321	1,2634	3,000	39,0
		15	0,08	1,1119	0,7798	0,8111	0,5449	0,2786	1,3904	1,0584	1,0897	0,8235	4,000	65,2
		16	0,05	1,2559	0,9270	0,9629	0,6948	0,1721	1,4280	1,0990	1,1349	0,8668	4,740	69,9
Plano 4	May-93	18	0,06	0,5875	0,4417	0,4577	0,3388	0,0843	0,6718	0,5260	0,5420	0,4231	0,620	8,4
		9	0,11	0,3531	0,2104	0,2204	0,1092	0,1527	0,5058	0,3631	0,3731	0,2619	0,500	1,2
		8	0,25	0,0408	0,0000	0,0000	0,0000	0,3880	0,4287	0,3880	0,3880	0,3880	2,000	78,6
		7	0,15	0,4285	0,2943	0,3072	0,1993	0,2143	0,6428	0,5086	0,5215	0,4136	1,000	35,7
		1	0,22	0,6612	0,4469	0,4659	0,2952	0,5268	1,1881	0,9737	0,9928	0,8220	0,350	135
		2	0,06	0,7568	0,5423	0,5642	0,3908	0,1308	0,8876	0,6732	0,6950	0,5216	2,000	55,6
		22	0,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Plano 5	Nov-93	11	0,07	1,1394	0,7306	0,7672	0,4413	0,2666	1,4060	0,9972	1,0338	0,7079	12,000	88,3
		12	0,09	1,2168	0,8118	0,8515	0,5254	0,3625	1,5793	1,1743	1,2140	0,8879	12,000	86,8
		16	0,05	1,2038	0,7968	0,8343	0,5088	0,2133	1,4171	1,0101	1,0476	0,7221	5,000	71,7
		17	0,07	1,3116	0,9120	0,9548	0,6299	0,2769	1,5885	1,1889	1,2317	0,9068	5,000	68,2
Plano 6	Ene-94	26	0,04	1,3914	1,0555	1,0975	0,8189	0,1351	1,5265	1,1906	1,2326	0,9540	1,000	4,6
		25	0,06	1,6089	1,2676	1,3132	1,0276	0,2084	1,8173	1,4760	1,5216	1,2360	5,000	63,7
		24	0,05	2,0221	1,6687	1,7208	1,4207	0,1799	2,2020	1,8486	1,9007	1,6006	7,000	68,5

		11	0,08	1,7656	1,4217	1,4701	1,1801	0,2787	2,0443	1,7004	1,7488	1,4589	7,000	70,8
		12	0,11	1,8281	1,4850	1,5350	1,2442	0,3946	2,2227	1,8796	1,9296	1,6388	7,750	71,3
		13	0,17	2,0573	1,7027	1,7544	1,4538	0,6150	2,6723	2,3177	2,3694	2,0687	6,000	55,5
Plano 6		14	0,22	1,6031	1,2665	1,3120	1,0298	0,8751	2,4781	2,1415	2,1871	1,9049	5,000	50,4
		15	0,18	2,3877	2,0403	2,1025	1,7980	0,6592	3,0469	2,6996	2,7617	2,4572	5,000	39,1
		16	0,10	1,5796	1,2499	1,2966	1,0184	0,3430	1,9226	1,5929	1,6396	1,3614	6,000	68,0
Plano 8	Oct-95	16	0,03	1,0441	0,6943	0,7253	0,4466	0,1078	1,1520	0,8021	0,8332	0,5544	2,000	42,4
		29	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		30	0,05	0,9458	0,6005	0,6301	0,3560	0,1665	1,1123	0,7671	0,7966	0,5225	0,350	49,3
Plano 9	Oct-95	33	0,04	1,0201	0,7643	0,7952	0,5840	0,0993	1,1194	0,8636	0,8945	0,6834	4,000	72,0
Plano 10	Jun-96	25	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		24	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		12	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		13	0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		27	0,04	1,2081	0,8000	0,8373	0,5113	0,1553	1,3633	0,9553	0,9925	0,6665	1,000	36,3

Ecuación No.5

Autor: Gill

Plano	Fecha	No. Espolón	Nivel de agua h	N =L / B	Z				Z Medida en plano	% Error
					d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	-	0,244	-	-	-	-	-	-
		2	-	0,071	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	2,237	0,128	0,1982	0,3379	0,3379	0,5639	2,83	80,075
Plano 3	May-93	11	-	0,065	-	-	-	-	-	-
		12	4,451	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2	100,000
		13	4,441	0,135	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2	100,000
		14	4,429	0,171	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3	100,000
		15	4,418	0,085	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	4	100,000
		16	4,410	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	4,74	100,000
Plano 4	May-93	18	1,925	0,060	0,1310	0,2490	0,2490	0,4398	0,62	29,068
		9	1,890	0,107	0,1072	0,2218	0,2218	0,4072	0,5	18,566
		8	1,837	0,246	0,1894	0,3057	0,3057	0,4938	2	75,310
		7	1,820	0,149	0,0991	0,2092	0,2092	0,3872	1	61,277
		1	2,865	0,217	0,0000	0,0140	0,0140	0,2666	0,35	23,814
		2	2,879	0,062	0,0000	0,0129	0,0129	0,2666	2	86,668
		22	-	0,333	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	5,596	0,065	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	12	100,000
		12	5,588	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	12	100,000
		16	5,545	0,053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		17	5,541	0,068	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
Plano 6	Ene-94	26	4,599	0,041	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	100,000
		25	4,590	0,062	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		24	4,582	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7	100,000

		11	4,572	0,082	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7	100,000
Plano 6		12	4,561	0,112	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7,75	100,000
		13	4,549	0,167	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6	100,000
		14	4,531	0,225	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		15	4,519	0,177	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		16	4,509	0,100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6	100,000
Plano 8	Oct-95	16	4,710	0,032	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2	100,000
		29	-	0,049	-	-	-	-	-	-
		30	4,693	0,049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,35	100,000
Plano 9	Oct-95	33	3,500	0,040	0,0000	0,0000	0,0000	0,1084	4	100,000
Plano 10	Jun-96	25	-	0,136	-	-	-	-	-	-
		24	-	0,156	-	-	-	-	-	-
		12	-	0,299	-	-	-	-	-	-
		13	-	0,448	-	-	-	-	-	-
		27	5,543	0,040	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	-100,000

Ecuación No.5

Autor: Gill + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Nivel de agua h	N = L / B	Z				Z Contracción	Z Total				Z Medida en plano	% Error
					d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	-	0,244	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	0,071	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	2,237	0,128	0,1982	0,3379	0,3379	0,5639	0,3169	0,5151	0,6548	0,6548	0,8808	2,83	68,9
Plano 3	May-93	11	-	0,065	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		12	4,451	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2886	0,2886	0,2886	0,2886	0,2886	2	85,6
		13	4,441	0,135	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4686	0,4686	0,4686	0,4686	0,4686	2	76,6
		14	4,429	0,171	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6123	0,6123	0,6123	0,6123	0,6123	3	79,6
		15	4,418	0,085	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2786	0,2786	0,2786	0,2786	0,2786	4	93,0
		16	4,410	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	4,74	96,4
Plano 4	May-93	18	1,925	0,060	0,1310	0,2490	0,2490	0,4398	0,0843	0,2153	0,3333	0,3333	0,5241	0,62	15,5
		9	1,890	0,107	0,1072	0,2218	0,2218	0,4072	0,1527	0,2599	0,3745	0,3745	0,5599	0,5	12,0
		8	1,837	0,246	0,1894	0,3057	0,3057	0,4938	0,3880	0,5774	0,6937	0,6937	0,8818	2	55,9
		7	1,820	0,149	0,0991	0,2092	0,2092	0,3872	0,2143	0,3133	0,4234	0,4234	0,6015	1	39,8
		1	2,865	0,217	0,0000	0,0140	0,0140	0,2666	0,5268	0,5268	0,5408	0,5408	0,7935	0,35	50,5
		2	2,879	0,062	0,0000	0,0129	0,0129	0,2666	0,1308	0,1308	0,1437	0,1437	0,3975	2	80,1
		22	-	0,333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	5,596	0,065	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2666	0,2666	0,2666	0,2666	0,2666	12	97,8
		12	5,588	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3625	0,3625	0,3625	0,3625	0,3625	12	97,0
		16	5,545	0,053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2133	0,2133	0,2133	0,2133	0,2133	5	95,7
		17	5,541	0,068	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2769	0,2769	0,2769	0,2769	0,2769	5	94,5
Plano 6	Ene-94	26	4,599	0,041	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1351	0,1351	0,1351	0,1351	0,1351	1	86,5

Ecuación No.5

Autor: Gill

Plano	Fecha	No. Espolón	Nivel de agua h	N = L / B	Z				Z Medida en plano	% Error
					d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	-	0,244	-	-	-	-	-	-
		2	-	0,071	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	2,237	0,128	0,1982	0,3379	0,3379	0,5639	2,83	80,075
Plano 3	May-93	11	-	0,065	-	-	-	-	-	-
		12	4,451	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2	100,000
		13	4,441	0,135	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2	100,000
		14	4,429	0,171	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3	100,000
		15	4,418	0,085	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	4	100,000
		16	4,410	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	4,74	100,000
Plano 4	May-93	18	1,925	0,060	0,1310	0,2490	0,2490	0,4398	0,62	29,068
		9	1,890	0,107	0,1072	0,2218	0,2218	0,4072	0,5	18,566
		8	1,837	0,246	0,1894	0,3057	0,3057	0,4938	2	75,310
		7	1,820	0,149	0,0991	0,2092	0,2092	0,3872	1	61,277
		1	2,865	0,217	0,0000	0,0140	0,0140	0,2666	0,35	23,814
		2	2,879	0,062	0,0000	0,0129	0,0129	0,2666	2	86,668
		22	-	0,333	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	5,596	0,065	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	12	100,000
		12	5,588	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	12	100,000
		16	5,545	0,053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		17	5,541	0,068	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
Plano 6	Ene-94	26	4,599	0,041	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	100,000
		25	4,590	0,062	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		24	4,582	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7	100,000

		11	4,572	0,082	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7	100,000
Plano 6		12	4,561	0,112	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7,75	100,000
		13	4,549	0,167	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6	100,000
		14	4,531	0,225	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		15	4,519	0,177	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5	100,000
		16	4,509	0,100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6	100,000
Plano 8	Oct-95	16	4,710	0,032	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2	100,000
		29	-	0,049	-	-	-	-	-	-
		30	4,693	0,049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,35	100,000
Plano 9	Oct-95	33	3,500	0,040	0,0000	0,0000	0,0000	0,1084	4	100,000
Plano 10	Jun-96	25	-	0,136	-	-	-	-	-	-
		24	-	0,156	-	-	-	-	-	-
		12	-	0,299	-	-	-	-	-	-
		13	-	0,448	-	-	-	-	-	-
		27	5,543	0,040	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	-100,000

Ecuación No.5

Autor: Gill + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Nivel de agua h	n L / B	Z				Z Contracción	Z Total				Z Medida en plano	% Error
					d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	-	0,244	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	0,071	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	2,237	0,128	0,1982	0,3379	0,3379	0,5639	0,3169	0,5151	0,6548	0,6548	0,8808	2,83	68,9
Plano 3	May-93	11	-	0,065	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		12	4,451	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2886	0,2886	0,2886	0,2886	0,2886	2	85,6
		13	4,441	0,135	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4686	0,4686	0,4686	0,4686	0,4686	2	76,6
		14	4,429	0,171	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6123	0,6123	0,6123	0,6123	0,6123	3	79,6
		15	4,418	0,085	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2786	0,2786	0,2786	0,2786	0,2786	4	93,0
		16	4,410	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	4,74	96,4
Plano 4	May-93	18	1,925	0,060	0,1310	0,2490	0,2490	0,4398	0,0843	0,2153	0,3333	0,3333	0,5241	0,62	15,5
		9	1,890	0,107	0,1072	0,2218	0,2218	0,4072	0,1527	0,2599	0,3745	0,3745	0,5599	0,5	12,0
		8	1,837	0,246	0,1894	0,3057	0,3057	0,4938	0,3880	0,5774	0,6937	0,6937	0,8818	2	55,9
		7	1,820	0,149	0,0991	0,2092	0,2092	0,3872	0,2143	0,3133	0,4234	0,4234	0,6015	1	39,8
		1	2,865	0,217	0,0000	0,0140	0,0140	0,2666	0,5268	0,5268	0,5408	0,5408	0,7935	0,35	50,5
		2	2,879	0,062	0,0000	0,0129	0,0129	0,2666	0,1308	0,1308	0,1437	0,1437	0,3975	2	80,1
		22	-	0,333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	5,596	0,065	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2666	0,2666	0,2666	0,2666	0,2666	12	97,8
		12	5,588	0,087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3625	0,3625	0,3625	0,3625	0,3625	12	97,0
		16	5,545	0,053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2133	0,2133	0,2133	0,2133	0,2133	5	95,7
		17	5,541	0,068	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2769	0,2769	0,2769	0,2769	0,2769	5	94,5
Plano 6	Ene-94	26	4,599	0,041	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1351	0,1351	0,1351	0,1351	0,1351	1	86,5

		25	4,590	0,062	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2084	0,2084	0,2084	0,2084	0,2084	5	95,8
		24	4,582	0,054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1799	0,1799	0,1799	0,1799	0,1799	7	97,4
		11	4,572	0,082	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2787	0,2787	0,2787	0,2787	0,2787	7	96,0
Plano 6		12	4,561	0,112	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3946	0,3946	0,3946	0,3946	0,3946	7,75	94,9
		13	4,549	0,167	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6150	0,6150	0,6150	0,6150	0,6150	6	89,8
		14	4,531	0,225	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,8751	0,8751	0,8751	0,8751	0,8751	5	82,5
		15	4,519	0,177	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6592	0,6592	0,6592	0,6592	0,6592	5	86,8
		16	4,509	0,100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3430	0,3430	0,3430	0,3430	0,3430	6	94,3
Plano 8	Oct-95	16	4,710	0,032	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1078	0,1078	0,1078	0,1078	0,1078	2	94,6
		29	-	0,049	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		30	4,693	0,049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,35	52,4
Plano 9	Oct-95	33	3,500	0,040	0,0000	0,0000	0,0000	0,1084	0,0993	0,0993	0,0993	0,0993	0,2078	4	97,5
Plano 10	Jun-96	25	-	0,136	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		24	-	0,156	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		12	-	0,299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		13	-	0,448	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		27	5,543	0,040	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1553	0,1553	0,1553	0,1553	0,1553	1	84,5

Ecuación No. 6

Autor: Das

Plano	Fecha	No. Espolón	No. Froude	Nivel de agua h	N = L / B	Z				Z Medida en plano	% Error
						D50=0,4mm	D50=0,5mm	D50=0,6mm	D50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	0,181	-	0,244	-	-	-	-		
		2	0,154	-	0,071	-	-	-	-		
Plano 2	Dic-91	10	0,153	2,230	0,128	1,2132	0,9974	0,8312	0,6974	2,830	57,13
Plano 3	May-93	11	0,179	-	0,065	-	-	-	-		
		12	0,176	4,451	0,087	4,2904	3,7426	3,3207	2,9809	2,000	49,05
		13	0,179	4,441	0,135	4,3573	3,8060	3,3813	3,0393	2,000	51,97
		14	0,179	4,429	0,171	4,2204	3,6784	3,2609	2,9247	3,000	2,51
		15	0,175	4,418	0,085	4,0323	3,5028	3,0949	2,7664	4,000	0,81
		16	0,182	4,410	0,054	4,2618	3,7184	3,2998	2,9627	4,740	10,09
Plano 4	May-93	18	0,182	1,925	0,060	1,1127	0,9224	0,7757	0,6576	0,620	6,07
		9	0,165	1,890	0,107	0,7747	0,6077	0,4790	0,3754	0,500	4,20
		8	0,129	1,837	0,246	0,3641	0,2262	0,1199	0,0343	2,000	81,79
		7	0,176	1,820	0,149	0,8230	0,6573	0,5298	0,4270	1,000	17,70
		1	0,173	2,865	0,217	1,8733	1,5764	1,3477	1,1635	0,350	232,43
		2	0,179	2,879	0,062	2,0256	1,7183	1,4815	1,2909	2,000	1,28
		22	0,160	-	0,333	-	-	-	-		
Plano 5	Nov-93	11	0,173	5,596	0,065	5,3086	4,6253	4,0989	3,6751	12,000	55,76
		12	0,177	5,588	0,087	5,4228	4,7329	4,2014	3,7734	12,000	54,81
		16	0,174	5,545	0,053	5,3799	4,6954	4,1680	3,7434	5,000	6,09
		17	0,181	5,541	0,068	5,5314	4,8376	4,3031	3,8728	5,000	3,25
Plano 6	Ene-94	26	0,188	4,599	0,041	4,6640	4,0836	3,6364	3,2763	1,000	227,63
		25	0,191	4,590	0,062	5,0691	4,4638	3,9976	3,6221	5,000	1,38
		24	0,197	4,582	0,054	5,8464	5,1930	4,6896	4,2842	7,000	16,48

		11	0,194	4,572	0,272	5,3449	4,7235	4,2448	3,8593	7,000	23,64
		12	0,196	4,561	0,112	5,4444	4,8175	4,3345	3,9456	7,750	29,75
		13	0,196	4,549	0,167	5,8832	5,2295	4,7259	4,3205	6,000	1,95
Plano 6		14	0,192	4,531	0,225	4,9931	4,3963	3,9366	3,5664	5,000	0,14
		15	0,208	4,519	0,177	6,4239	5,7382	5,2099	4,7846	5,000	4,20
		16	0,195	4,509	0,100	4,9029	4,3131	3,8588	3,4930	6,000	18,29
Plano 8	Oct-95	16	0,173	4,710	0,032	4,2005	3,6421	3,2119	2,8656	2,000	43,28
		29	0,170	-	0,035	-	-	-	-		
		30	0,172	4,693	0,049	3,9939	3,4495	3,0302	2,6925	0,350	669,29
Plano 9	Oct-95	33	0,186	3,500	0,040	2,9500	2,5458	2,2344	1,9837	4,000	26,25
Plano 10	Jun-96	25	0,152	-	0,136	-	-	-	-		
		24	0,156	-	0,156	-	-	-	-		
		12	0,155	-	0,299	-	-	-	-		
		13	0,160	-	0,448	-	-	-	-		
		27	0,174	5,543	0,034	5,3919	4,7067	4,1788	3,7538	1,000	275,38

Ecuación No.6

Autor: Das + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	No. Froude	Nivel de agua h	N L / B	Z				Z Contracción	Z Total				Z Medida en plano	% Error	
						d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm			
Plano 1	Sep-90	1	0,181	-	0,244	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		2	0,154	-	0,071	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Plano 2	Dic-91	10	0,153	2,230	0,128	1,2132	0,9974	0,8312	0,6974	0,3169	1,5301	1,3143	1,1481	1,0143	2,830	45,9	
Plano 3	May-93	11	0,179	-	0,065	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		12	0,176	4,451	0,087	4,2904	3,7426	3,3207	2,9809	0,2886	4,5790	4,0313	3,6093	3,2696	2,000	63,5	
		13	0,179	4,441	0,135	4,3573	3,8060	3,3813	3,0393	0,4686	4,8259	4,2746	3,8499	3,5079	2,000	75,4	
		14	0,179	4,429	0,171	4,2204	3,6784	3,2609	2,9247	0,6123	4,8327	4,2907	3,8732	3,5370	3,000	17,9	
		15	0,175	4,418	0,085	4,0323	3,5028	3,0949	2,7664	0,2786	4,3108	3,7813	3,3734	3,0450	4,000	5,5	
		16	0,182	4,410	0,054	4,2618	3,7184	3,2998	2,9627	0,1721	4,4339	3,8905	3,4719	3,1348	4,740	6,5	
Plano 4	May-93	18	0,182	1,925	0,060	1,1127	0,9224	0,7757	0,6576	0,0843	1,1970	1,0067	0,8600	0,7419	0,620	19,7	
		9	0,165	1,890	0,107	0,7747	0,6077	0,4790	0,3754	0,1527	0,9273	0,7604	0,6317	0,5281	0,500	5,6	
		8	0,129	1,837	0,246	0,3641	0,2262	0,1199	0,0343	0,3880	0,7521	0,6141	0,5079	0,4223	2,000	62,4	
		7	0,176	1,820	0,149	0,8230	0,6573	0,5298	0,4270	0,2143	1,0372	0,8716	0,7440	0,6413	1,000	3,7	
		1	0,173	2,865	0,217	1,8733	1,5764	1,3477	1,1635	0,5268	2,4001	2,1032	1,8745	1,6904	0,350	383	
		2	0,179	2,879	0,062	2,0256	1,7183	1,4815	1,2909	0,1308	2,1564	1,8491	1,6124	1,4218	2,000	7,8	
		22	0,160	-	0,333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		11	0,173	5,596	0,065	5,3086	4,6253	4,0989	3,6751	0,2666	5,5752	4,8919	4,3655	3,9417	12,000	53,5	
Plano 5	Nov-93	12	0,177	5,588	0,087	5,4228	4,7329	4,2014	3,7734	0,3625	5,7853	5,0953	4,5638	4,1359	12,000	51,8	
		16	0,174	5,545	0,053	5,3799	4,6954	4,1680	3,7434	0,2133	5,5932	4,9087	4,3813	3,9567	5,000	1,8	

		17	0,181	5,541	0,068	5,5314	4,8376	4,3031	3,8728	0,2769	5,8083	5,1145	4,5800	4,1497	5,000	2,3
Plano 6	Ene-94	26	0,188	4,599	0,041	4,6640	4,0836	3,6364	3,2763	0,1351	4,7991	4,2186	3,7715	3,4114	1,000	241
		25	0,191	4,590	0,062	5,0691	4,4638	3,9976	3,6221	0,2084	5,2775	4,6722	4,2059	3,8305	5,000	5,6
		24	0,197	4,582	0,054	5,8464	5,1930	4,6896	4,2842	0,1799	6,0264	5,3729	4,8695	4,4641	7,000	13,9
		11	0,194	4,572	0,272	5,3449	4,7235	4,2448	3,8593	0,2787	5,6236	5,0022	4,5235	4,1380	7,000	19,7
Plano 6		12	0,196	4,561	0,112	5,4444	4,8175	4,3345	3,9456	0,3946	5,8390	5,2121	4,7291	4,3402	7,750	24,7
		13	0,196	4,549	0,167	5,8832	5,2295	4,7259	4,3205	0,6150	6,4982	5,8445	5,3409	4,9355	6,000	2,6
		14	0,192	4,531	0,225	4,9931	4,3963	3,9366	3,5664	0,8751	5,8682	5,2714	4,8116	4,4414	5,000	3,8
		15	0,208	4,519	0,177	6,4239	5,7382	5,2099	4,7846	0,6592	7,0831	6,3974	5,8691	5,4438	5,000	8,9
		16	0,195	4,509	0,100	4,9029	4,3131	3,8588	3,4930	0,3430	5,2459	4,6561	4,2018	3,8360	6,000	12,6
Plano 8	Oct-95	16	0,173	4,710	0,032	4,2005	3,6421	3,2119	2,8656	0,1078	4,3083	3,7499	3,3198	2,9734	2,000	48,7
		29	0,170	-	0,035	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		30	0,172	4,693	0,049	3,9939	3,4495	3,0302	2,6925	0,1665	4,1604	3,6161	3,1967	2,8590	0,350	717
Plano 9	Oct-95	33	0,186	3,500	0,040	2,9500	2,5458	2,2344	1,9837	0,0993	3,0493	2,6451	2,3338	2,0831	4,000	23,8
Plano 10	Jun-96	25	0,152	-	0,136	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		24	0,156	-	0,156	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		12	0,155	-	0,299	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		13	0,160	-	0,448	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		27	0,174	5,543	0,034	5,3919	4,7067	4,1788	3,7538	0,1553	5,5471	4,8619	4,3341	3,9091	1,000	291

Ecuación No.7

Autor: Neill

Plano	Fecha	No. Espolón	q caudal / ancho	Nivel de agua h	Z CON 2.1				Z CON 2.75				Z Medida en plano	% Error	
					d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm	d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm			
Plano 1	Sep-90	1	0,796	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2	0,474	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Plano 2	Dic-91	10	0,741	2,237	0,334	0,274	0,226	0,186	1,129	1,051	0,988	0,936	2,83	60	
Plano 3	May-93	11	2,255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		12	2,671	4,451	1,589	1,448	1,335	1,242	3,459	3,274	3,126	3,003	2	0	
		13	2,029	4,441	0,588	0,471	0,377	0,299	2,145	1,991	1,868	1,766	2	0	
		14	2,418	4,429	1,223	1,091	0,986	0,898	2,973	2,800	2,662	2,547	3	1	
		15	2,497	4,418	1,356	1,222	1,114	1,024	3,144	2,967	2,826	2,709	4	21	
		16	3,377	4,410	2,651	2,486	2,354	2,245	4,837	4,621	4,448	4,305	4,74	6	
Plano 4	May-93	18	1,075	1,925	1,368	1,292	1,230	1,179	2,388	2,287	2,207	2,140	0,62	90	
		9	0,413	1,890	0,000	0,000	0,000	0,000	0,390	0,337	0,294	0,259	0,5	22	
		8	1,553	1,837	2,371	2,273	2,194	2,129	3,674	3,545	3,442	3,357	2	6	
		7	0,748	1,820	0,768	0,708	0,659	0,619	1,569	1,490	1,427	1,374	1	1	
		1	0,523	2,865	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,35	100
		2	0,666	2,879	0,000	0,000	0,000	0,000	0,258	0,185	0,126	0,077	2	87	
		22	0,257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	7,167	5,596	6,060	5,788	5,570	5,389	9,668	9,311	9,026	8,790	12	19	
		12	8,286	5,588	7,250	6,950	6,711	6,511	11,224	10,831	10,517	10,256	12	6	
		16	6,879	5,545	5,797	5,532	5,320	5,144	9,308	8,961	8,683	8,453	5	3	
		17	10,759	5,541	9,736	9,380	9,094	8,857	14,465	13,998	13,624	13,314	5	77	
Plano 6	Ene-94	26	3,866	4,599	3,127	2,946	2,802	2,682	5,518	5,282	5,093	4,936	1	168	
		25	4,719	4,590	4,233	4,027	3,863	3,726	6,964	6,695	6,479	6,300	5	3	
		24	6,472	4,582	6,308	6,053	5,850	5,681	9,678	9,345	9,079	8,858	7	4	

Ecuación No.7

Autor: Neill + contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	q caudal/ancho	Nivel de Agua h	Z Contracción	Z Total con 2.1				Z Total con 2.75				Z Medida en plano	% Error	
						d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm	d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm			
Plano 1	Sep-90	1	0,796	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		2	0,474	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Plano 2	Dic-91	10	0,741	2,237	0,317	0,651	0,591	0,543	0,503	1,446	1,368	1,305	1,253	2,83	49	
Plano 3	May-93	11	2,255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		12	2,671	4,451	0,289	1,878	1,737	1,624	1,530	3,747	3,563	3,415	3,292	2	2	
		13	2,029	4,441	0,469	1,057	0,939	0,845	0,767	2,613	2,460	2,337	2,235	2	3	
		14	2,418	4,429	0,612	1,836	1,704	1,598	1,510	3,585	3,412	3,274	3,159	3	5	
		15	2,497	4,418	0,279	1,635	1,500	1,392	1,303	3,422	3,246	3,104	2,987	4	14	
		16	3,377	4,410	0,172	2,823	2,658	2,526	2,417	5,009	4,793	4,620	4,477	4,74	1	
Plano 4	May-93	18	1,075	1,925	0,084	1,453	1,376	1,314	1,263	2,472	2,371	2,291	2,224	0,62	104	
		9	0,413	1,890	0,153	0,153	0,153	0,153	0,153	0,543	0,489	0,447	0,411	0,5	9	
		8	1,553	1,837	0,388	2,759	2,661	2,582	2,517	4,062	3,933	3,830	3,744	2	26	
		7	0,748	1,820	0,214	0,982	0,922	0,874	0,833	1,783	1,704	1,641	1,588	1	2	
		1	0,523	2,865	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,35	51
		2	0,666	2,879	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,389	0,315	0,257	0,208	2	81
		22	0,257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Plano 5	Nov-93	11	7,167	5,596	0,267	6,327	6,055	5,837	5,656	9,935	9,578	9,293	9,056	12	17	
		12	8,286	5,588	0,362	7,613	7,313	7,073	6,874	11,586	11,194	10,880	10,619	12	3	
		16	6,879	5,545	0,213	6,010	5,745	5,534	5,358	9,521	9,174	8,897	8,666	5	7	
		17	10,759	5,541	0,277	10,013	9,656	9,371	9,134	14,742	14,275	13,901	13,591	5	83	
Plano 6	Ene-94	26	3,866	4,599	0,135	3,262	3,081	2,937	2,817	5,653	5,417	5,228	5,071	1	182	
		25	4,719	4,590	0,208	4,442	4,236	4,071	3,934	7,173	6,903	6,687	6,508	5	3	

Ecuación No.8

Autor: Buy Nogk

Plano	Fecha	No. Espolón	n L/B	α	hg	h	No. Froude	d50=0,4mm		d50=0,5mm		d50=0,6mm		d50=0,7mm		Z				Z Medida en plano	% Error
								f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	0,073	90			0,1812	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		2	0,052	90			0,1536	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	0,128	87	6	2,24	0,1529	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,2223	0,9880	0,9985	0,8212	2,83	57
Plano 3	May-93	11	0,048	78	6,5		0,1795	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		12	0,070	90	6,5	4,45	0,1762	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,4664	1,1128	1,1468	0,8627	2	27
		13	0,068	77	6,5	4,44	0,1787	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,3475	1,0063	1,0412	0,7651	2	33
		14	0,056	95	6,5	4,43	0,1793	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,5920	1,2382	1,2749	0,9883	3	47
		15	0,055	107	6,5	4,42	0,1753	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,6292	1,2661	1,3003	1,0093	4	59
		16	0,054	86	6,5	4,41	0,1816	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,5310	1,1861	1,2238	0,9426	4,74	68
Plano 4	May-93	18	0,068	83	6	1,93	0,1817	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,5935	1,3894	1,4117	1,2453	0,62	101
		9	0,051	88	6	1,89	0,1646	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,3523	1,1461	1,1605	0,9997	0,5	100
		8	0,090	90	6	1,84	0,1288	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	0,8418	0,6348	0,6344	0,4870	2	58
		7	0,038	90	6	1,82	0,1763	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,5275	1,3276	1,3469	1,1863	1	19
		1	0,049	85	7	2,86	0,1730	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,6897	1,4129	1,4374	1,2168	0,35	248
		2	0,050	75	8	2,88	0,1786	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,9461	1,6615	1,6905	1,4604	2	3
		22	0,148	70	6		0,1595	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	0,026	90	6,5	5,6	0,1733	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,0000	0,5997	0,6355	0,3163	12	92
		12	0,022	90	6,5	5,59	0,1769	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,1008	0,7027	0,7417	0,4213	12	91
		16	0,032	88	6,5	5,54	0,1744	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,0317	0,6350	0,6716	0,3543	5	79
		17	0,020	90	6,5	5,54	0,1808	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,2245	0,8300	0,8723	0,5515	5	76
Plano 6	Ene-94	26	0,041	90	6,5	4,6	0,1880	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,6911	1,3384	1,3825	1,0900	1	9
		25	0,062	90	6,5	4,59	0,1915	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,8239	1,4708	1,5180	1,2225	5	64
		24	0,102	75	6,5	4,58	0,1967	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,8118	1,4697	1,5201	1,2296	7	74

		11	0,076	90	6,5	4,57	0,1941	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,9265	1,5739	1,6234	1,3262	7	72
		12	0,079	90	6,5	4,56	0,1961	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,9839	1,6324	1,6836	1,3857	7,75	74
Plano 6		13	0,111	75	6,5	4,55	0,1961	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,8214	1,4794	1,5293	1,2394	6	70
		14	0,062	95	6,5	4,53	0,1921	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,9194	1,5654	1,6133	1,3166	5	62
		15	0,115	75	6,5	4,52	0,2082	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	2,1382	1,8034	1,8633	1,5698	5	57
		16	0,050	96	6,5	4,51	0,1945	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,9765	1,6253	1,6751	1,3787	6	67
Plano 8	Oct-95	16	0,042	50	6,5	4,71	0,1730	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	0,6053	0,2821	0,3108	0,0533	2	70
		29	0,018	93	5		0,1696	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		30	0,032	104	5	4,69	0,1716	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	0,7710	0,4364	0,4651	0,1995	0,35	25
Plano 9	Oct-95	33	0,040	97	7	3,5	0,1863	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	2,0603	1,7456	1,7836	1,5239	4	48
Plano 10	Jun-96	25	0,068	94	6,5		0,1516	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		24	0,125	110	6,5		0,1563	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		12	0,119	117	6,5		0,1554	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		13	0,164	95	6,5		0,1599	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	-	-	-	-	-	-
		27	0,034	76	9,5	5,54	0,1740	4,6	0,78	4,8	0,84	5	0,86	5	0,89	1,9094	1,4590	1,5001	1,1402	1	14

Ecuación No. 8

Autor: Buy Ngok + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z				Z Contracción	Z Total				Z Medida en el plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 1	Sep-90	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	1,2223	0,9880	0,9985	0,8212	0,3169	1,5392	1,3049	1,3154	1,1381	2,83	45,6
Plano 3	May-93	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		12	1,4664	1,1128	1,1468	0,8627	0,2886	1,7550	1,4014	1,4354	1,1513	2	12,2
		13	1,3475	1,0063	1,0412	0,7651	0,4686	1,8161	1,4749	1,5097	1,2337	2	9,2
		14	1,5920	1,2382	1,2749	0,9883	0,6123	2,2043	1,8506	1,8872	1,6006	3	26,5
		15	1,6292	1,2661	1,3003	1,0093	0,2786	1,9078	1,5447	1,5789	1,2878	4	52,3
		16	1,5310	1,1861	1,2238	0,9426	0,1721	1,7031	1,3582	1,3958	1,1147	4,74	64,1
Plano 4	May-93	18	1,5935	1,3894	1,4117	1,2453	0,0843	1,6778	1,4737	1,4960	1,3296	0,62	114,5
		9	1,3523	1,1461	1,1605	0,9997	0,1527	1,5050	1,2988	1,3132	1,1524	0,5	130,5
		8	0,8418	0,6348	0,6344	0,4870	0,3880	1,2298	1,0228	1,0224	0,8750	2	38,5
		7	1,5275	1,3276	1,3469	1,1863	0,2143	1,7418	1,5419	1,5612	1,4006	1	40,1
		1	1,6897	1,4129	1,4374	1,2168	0,5268	2,2165	1,9397	1,9643	1,7437	0,35	398,2
		2	1,9461	1,6615	1,6905	1,4604	0,1308	2,0769	1,7923	1,8213	1,5912	2	3,8
		22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	1,0000	0,5997	0,6355	0,3163	0,2666	1,2666	0,8663	0,9021	0,5829	12	89,4
		12	1,1008	0,7027	0,7417	0,4213	0,3625	1,4633	1,0652	1,1042	0,7837	12	87,8
		16	1,0317	0,6350	0,6716	0,3543	0,2133	1,2450	0,8483	0,8849	0,5676	5	75,1
		17	1,2245	0,8300	0,8723	0,5515	0,2769	1,5014	1,1069	1,1492	0,8284	5	70,0
Plano 6	Ene-94	26	1,6911	1,3384	1,3825	1,0900	0,1351	1,8262	1,4735	1,5176	1,2251	1	22,5
		25	1,8239	1,4708	1,5180	1,2225	0,2084	2,0323	1,6792	1,7264	1,4309	5	59,4
		24	1,8118	1,4697	1,5201	1,2296	0,1799	1,9918	1,6496	1,7001	1,4096	7	71,5

		11	1,9265	1,5739	1,6234	1,3262	0,2787	2,2052	1,8526	1,9022	1,6049	7	68,5
		12	1,9839	1,6324	1,6836	1,3857	0,3946	2,3785	2,0270	2,0782	1,7803	7,75	69,3
		13	1,8214	1,4794	1,5293	1,2394	0,6150	2,4364	2,0944	2,1443	1,8544	6	59,4
Plano 6		14	1,9194	1,5654	1,6133	1,3166	0,8751	2,7944	2,4405	2,4884	2,1916	5	44,1
		15	2,1382	1,8034	1,8633	1,5698	0,6592	2,7974	2,4626	2,5225	2,2290	5	44,1
		16	1,9765	1,6253	1,6751	1,3787	0,3430	2,3195	1,9683	2,0180	1,7217	6	61,3
Plano 8	Oct-95	16	0,6053	0,2821	0,3108	0,0533	0,1078	0,7131	0,3899	0,4186	0,1611	2	64,3
		29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		30	0,7710	0,4364	0,4651	0,1995	0,1665	0,9375	0,6030	0,6317	0,3660	0,35	4,6
Plano 9	Oct-95	33	2,0603	1,7456	1,7836	1,5239	0,0993	2,1596	1,8450	1,8830	1,6232	4	46,0
Plano 10	Jun-96	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		27	1,9094	1,4590	1,5001	1,1402	0,1553	2,0647	1,6142	1,6553	1,2954	1	29,5

Ecuación No.9

Autor: Liu

Plano	Fecha	No. Espolón	Velocidad	No. Froude	Longitud	Nivel del agua h	Z	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	0,6353	0,1812	12	-	-	-	
		2	0,4787	0,1536	11	-	-	-	
Plano 2	Dic-91	10	0,5537	0,1529	25	2,2370	2,9712	2,83	4,99
Plano 3	May-93	11	0,8931	0,1795	11	-	-	-	-
		12	0,9334	0,1762	16	4,4507	3,9354	2	96,77
		13	0,8598	0,1787	15	4,4408	3,8480	2	92,40
		14	0,9137	0,1793	13	4,4289	3,6324	3	21,08
		15	0,9096	0,1753	13	4,4179	3,5997	4	10,01
Plano 4	May-93	16	1,0299	0,1816	10	4,4104	3,2757	4,74	30,89
		18	0,7034	0,1817	17	1,9252	2,4637	0,62	297,37
		9	0,4786	0,1646	12	1,8904	2,0517	0,5	310,35
		8	0,6322	0,1288	11	1,8374	1,7967	2	10,16
		7	0,6111	0,1763	9	1,8200	1,8287	1	82,87
		1	0,5355	0,1730	9	2,8648	2,3858	0,35	581,65
Plano 5	Nov-93	2	0,5928	0,1786	12	2,8786	2,7128	2	35,64
		22	0,4005	0,1595	20	-	-	-	-
		11	1,2692	0,1734	6	5,5958	3,0340	12	74,72
		12	1,3501	0,1769	5	5,5876	2,8364	12	76,36
Plano 6	Ene-94	16	1,2711	0,1744	6	5,5446	3,0231	5	39,54
		17	1,5109	0,1808	3	5,5407	2,3172	5	53,66
		26	1,1027	0,1880	8	4,5994	3,1081	1	210,81
Plano 6	Ene-94	25	1,1927	0,1915	12	4,5903	3,6727	5	26,55
		24	1,3494	0,1967	19	4,5820	4,4487	7	36,45
		11	1,2845	0,1941	14	4,5717	3,9146	7	44,08

		12	1,2573	0,1961	14	4,5609	3,9219	7,75	49,40
		13	1,1833	0,1961	20	4,5485	4,5163	6	24,73
Plano 6		14	1,2323	0,1921	11	4,5311	3,5233	5	29,53
		15	1,4407	0,2082	13	4,5189	3,8620	5	22,76
		16	1,4198	0,1945	5	4,5088	2,5735	6	57,11
Plano 8	Oct-95	16	0,9015	0,1730	13	4,7103	3,7244	2	86,22
		29	0,8410	0,1696	5	-	-	-	-
		30	0,8711	0,1716	9	4,6932	3,1998	0,35	814,23
Plano 9	Oct-95	33	1,0026	0,1863	10	3,5000	2,8758	4	28,11
Plano 10	Jun-96	25	0,5063	0,1516	6	-	-	-	-
		24	0,5278	0,1563	8	-	-	-	-
		12	0,5215	0,1554	8	-	-	-	-
		13	0,5260	0,1599	11	-	-	-	-
		27	0,7704	0,1740	14	5,5426	4,2386	1	323,86

Ecuación No.9

Autor: Liu + socavación por contracción

Plano	Fecha	No .Espolón	Velocidad	No .Froude	Longitud	Nivel de agua h	Z	Z Contracción	Z Total	Z Medida en el plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	0,6353	0,1812	12	-	-	-	-	-	
		2	0,4787	0,1536	11	-	-	-	-	-	
Plano 2	Dic-91	10	0,5537	0,1529	25	2,2370	2,9712	0,3169	3,2881	2,83	16,19
Plano 3	May-93	11	0,8931	0,1795	11	-	-	-	-	-	-
		12	0,9334	0,1762	16	4,4507	3,9354	0,2886	4,2240	2	111,20
		13	0,8598	0,1787	15	4,4408	3,8480	0,4686	4,3166	2	115,83
		14	0,9137	0,1793	13	4,4289	3,6324	0,6123	4,2447	3	41,49
		15	0,9096	0,1753	13	4,4179	3,5997	0,2786	3,8783	4	3,04
		16	1,0299	0,1816	10	4,4104	3,2757	0,1721	3,4478	4,74	27,26
Plano 4	May-93	18	0,7034	0,1817	17	1,9252	2,4637	0,0843	2,5480	0,62	310,97
		9	0,4786	0,1646	12	1,8904	2,0517	0,1527	2,2044	0,5	340,89
		8	0,6322	0,1288	11	1,8374	1,7967	0,3880	2,1847	2	9,23
		7	0,6111	0,1763	9	1,8200	1,8287	0,2143	2,0430	1	104,30
		1	0,5355	0,1730	9	2,8648	2,3858	0,5268	2,9126	0,35	732,17
		2	0,5928	0,1786	12	2,8786	2,7128	0,1308	2,8436	2	42,18
		22	0,4005	0,1595	20	-	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	1,2692	0,1734	6	5,5958	3,0340	0,2666	3,3006	12	72,50
		12	1,3501	0,1769	5	5,5876	2,8364	0,3625	3,1989	12	73,34
		16	1,2711	0,1744	6	5,5446	3,0231	0,2133	3,2364	5	35,27
		17	1,5109	0,1808	3	5,5407	2,3172	0,2769	2,5941	5	48,12
Plano 6	Ene-94	26	1,1027	0,1880	8	4,5994	3,1081	0,1351	3,2431	1	224,31
		25	1,1927	0,1915	12	4,5903	3,6727	0,2084	3,8811	5	22,38
		24	1,3494	0,1967	19	4,5820	4,4487	0,1799	4,6286	7	33,88

		11	1,2845	0,1941	14	4,5717	3,9146	0,2787	4,1933	7	40,10
		12	1,2573	0,1961	14	4,5609	3,9219	0,3946	4,3165	7,75	44,30
Plano 6		13	1,1833	0,1961	20	4,5485	4,5163	0,6150	5,1313	6	14,48
		14	1,2323	0,1921	11	4,5311	3,5233	0,8751	4,3983	5	12,03
		15	1,4407	0,2082	13	4,5189	3,8620	0,6592	4,5213	5	9,57
		16	1,4198	0,1945	5	4,5088	2,5735	0,3430	2,9164	6	51,39
Plano 8	Oct-95	16	0,9015	0,1730	13	4,7103	3,7244	0,1078	3,8322	2	91,61
		29	0,8410	0,1696	5	-	-	-	-	-	-
		30	0,8711	0,1716	9	4,6932	3,1998	0,1665	3,3664	0,35	861,82
Plano 9	Oct-95	33	1,0026	0,1863	10	3,5000	2,8758	0,0993	2,9751	4	25,62
Plano 10	Jun-96	25	0,5063	0,1516	6	-	-	-	-	-	-
		24	0,5278	0,1563	8	-	-	-	-	-	-
		12	0,5215	0,1554	8	-	-	-	-	-	-
		13	0,5260	0,1599	11	-	-	-	-	-	-
		27	0,7704	0,1740	14	5,5426	4,2386	0,1553	4,3939	1	339,39

Ecuación No.10

Autor: Richardson

Plano	Fecha	No. Espolón	Nivel de agua h	No. Froude	Z	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1		0,181	0,000		
		2		0,154	0,000		
Plano 2	Dic-91	10	2,237	0,153	4,814	2,83	70,123
Plano 3	May-93	11		0,179	0,000		
		12	4,451	0,176	10,038	2	401,894
		13	4,441	0,179	10,063	2	403,141
		14	4,429	0,179	10,048	3	234,924
		15	4,418	0,175	9,947	4	148,685
		16	4,410	0,182	10,047	4,74	111,958
Plano 4	May-93	18	1,925	0,182	4,387	0,62	607,525
		9	1,890	0,165	4,169	0,5	733,737
		8	1,837	0,129	3,737	2	86,858
		7	1,820	0,176	4,106	1	310,591
		1	2,865	0,173	6,422	0,35	1734,985
		2	2,879	0,179	6,521	2	226,074
		22		0,160	0,000		
Plano 5	Nov-93	11	5,596	0,173	12,552	12	4,602
		12	5,588	0,177	12,620	12	5,164
		16	5,545	0,174	12,465	5	149,292
		17	5,541	0,181	12,603	5	152,062
Plano 6	Ene-94	26	4,599	0,188	10,599	1	959,909
		25	4,590	0,191	10,641	5	112,818
		24	4,582	0,197	10,717	7	53,105

		11	4,572	0,194	10,646	7	52,091
		12	4,561	0,196	10,656	7,75	37,497
Plano 6		13	4,549	0,196	10,628	6	77,134
		14	4,531	0,192	10,515	5	110,298
		15	4,519	0,208	10,769	5	115,385
		16	4,509	0,195	10,507	6	75,120
Plano 8	Oct-95	16	4,710	0,173	10,559	2	427,957
		29		0,170	0,000		
		30	4,693	0,172	10,494	0,35	2898,323
Plano 9	Oct-95	33	3,500	0,186	8,041	4	101,027
Plano 10	Jun-96	25		0,152	0,000		
		24		0,156	0,000		
		12		0,155	0,000		
		13		0,160	0,000		
		27	5,543	0,174	12,451	1	1145,063

Ecuación No. 10

Autor: Richardson + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Nivel de agua h	No. Froude	Z	Z Contracción	Z Total	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	-	0,181	-	-	-	-	-
		2	-	0,154	-	-	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	2,237	0,153	4,814	0,317	5,131	2,83	81,322
Plano 3	May-93	11	-	0,179	-	-	-	-	-
		12	4,451	0,176	10,038	0,289	10,327	2	416,326
		13	4,441	0,179	10,063	0,469	10,531	2	426,570
		14	4,429	0,179	10,048	0,612	10,660	3	255,335
		15	4,418	0,175	9,947	0,279	10,226	4	155,650
		16	4,410	0,182	10,047	0,172	10,219	4,74	115,588
Plano 4	May-93	18	1,925	0,182	4,387	0,084	4,471	0,62	621,120
		9	1,890	0,165	4,169	0,153	4,321	0,5	764,277
		8	1,837	0,129	3,737	0,388	4,125	2	106,256
		7	1,820	0,176	4,106	0,214	4,320	1	332,019
		1	2,865	0,173	6,422	0,527	6,949	0,35	1885,509
		2	2,879	0,179	6,521	0,131	6,652	2	232,615
		22	-	0,160	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	5,596	0,173	12,552	0,267	12,819	12	6,824
		12	5,588	0,177	12,620	0,362	12,982	12	8,184
		16	5,545	0,174	12,465	0,213	12,678	5	153,558
		17	5,541	0,181	12,603	0,277	12,880	5	157,600
Plano 6	Ene-94	26	4,599	0,188	10,599	0,135	10,734	1	973,416
		25	4,590	0,191	10,641	0,208	10,849	5	116,986
		24	4,582	0,197	10,717	0,180	10,897	7	55,675

		11	4,572	0,194	10,646	0,279	10,925	7	56,073
		12	4,561	0,196	10,656	0,395	11,051	7,75	42,589
Plano 6		13	4,549	0,196	10,628	0,615	11,243	6	87,384
		14	4,531	0,192	10,515	0,875	11,390	5	127,799
		15	4,519	0,208	10,769	0,659	11,428	5	128,569
		16	4,509	0,195	10,507	0,343	10,850	6	80,836
Plano 8	Oct-95	16	4,710	0,173	10,559	0,108	10,667	2	433,349
		29	-	0,170	-	0,000	-	-	-
		30	4,693	0,172	10,494	0,167	10,661	0,35	2945,909
Plano 9	Oct-95	33	3,500	0,186	8,041	0,099	8,140	4	103,511
Plano 10	Jun-96	25	-	0,152	-	-	-	-	-
		24	-	0,156	-	-	-	-	-
		12	-	0,155	-	-	-	-	-
		13	-	0,160	-	-	-	-	-
		27	5,543	0,174	12,451	0,155	12,606	1	1160,589

Ecuación No.11

Autor: Zagloul

Plano	Fecha	No. Espolón	No. Froude	Nivel de agua h	α	N=L / B	Z	Z Medida en el plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	0,1812	-	90	0,0732	-	-	-
		2	0,1536	-	90	0,0524	-	-	-
Plano 2	Dic-91	10	0,1529	2,2370	87	0,1276	1,5805	2,83	44,152
Plano 3	May-93	11	0,1795	-	78	0,0478	-	-	-
		12	0,1762	4,4507	90	0,0696	3,2455	2	62,277
		13	0,1787	4,4408	77	0,0676	3,2434	2	62,171
		14	0,1793	4,4289	95	0,0556	3,2278	3	7,593
		15	0,1753	4,4179	107	0,0551	3,1903	4	20,242
		16	0,1816	4,4104	86	0,0538	3,2209	4,74	32,049
Plano 4	May-93	18	0,1817	1,9252	83	0,0680	1,4262	0,62	130,036
		9	0,1646	1,8904	88	0,0513	1,2907	0,5	158,143
		8	0,1288	1,8374	90	0,0902	1,1121	2	44,397
		7	0,1763	1,8200	90	0,0383	1,2848	1	28,478
		1	0,1730	2,8648	85	0,0489	2,0144	0,35	475,544
		2	0,1786	2,8786	75	0,0498	2,0605	2	3,026
		22	0,1595	-	70	0,1481	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	0,1733	5,5958	90	0,0261	3,8560	12	67,867
		12	0,1769	5,5876	90	0,0217	3,8864	12	67,613
		16	0,1744	5,5446	88	0,0319	3,8570	5	22,859
		17	0,1808	5,5407	90	0,0204	3,9043	5	21,915
Plano 6	Ene-94	26	0,1880	4,5994	90	0,0408	3,3982	1	239,817
		25	0,1915	4,5903	90	0,0619	3,5092	5	29,816
		24	0,1967	4,5820	75	0,1022	3,7023	7	47,109

		11	0,1941	4,5717	90	0,0761	3,5818	7	48,832
		12	0,1961	4,5609	90	0,0787	3,6070	7,75	53,458
Plano 6		13	0,1961	4,5485	75	0,1111	3,7046	6	38,256
		14	0,1921	4,5311	95	0,0618	3,4797	5	30,405
		15	0,2082	4,5189	75	0,1150	3,8472	5	23,057
		16	0,1945	4,5088	96	0,0500	3,4505	6	42,491
Plano 8	Oct-95	16	0,1730	4,7103	50	0,0419	3,2435	2	62,175
		29	0,1696	-	93	0,0176	-	-	-
		30	0,1716	4,6932	104	0,0317	3,2555	0,35	830,134
Plano 9	Oct-95	33	0,1863	3,5000	97	0,0395	2,5756	4	35,611
Plano 10	Jun-96	25	0,1516	-	94	0,0682	-	-	-
		24	0,1563	-	110	0,1250	-	-	-
		12	0,1554	-	117	0,1194	-	-	-
		13	0,1599	-	95	0,1642	-	-	-
		27	0,1740	5,5426	76	0,0343	3,8390	1	283,900

Ecuación No.11

Autor: Zagloul + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	No. Froude	NIVEL DEL AGUA h	α	N = L / B	Z	Z Contracción	Z Total	Z Medida en plano	% Error
Plano 1	Sep-90	1	0,1812	-	90	0,0732	-	-	-	-	
		2	0,1536	-	90	0,0524	-	-	-	-	
Plano 2	Dic-91	10	0,1529	2,2370	87	0,1276	1,5805	0,3169	1,8974	2,83	32,954
Plano 3	May-93	11	0,1795	-	78	0,0478	0,0000	0,0000	0,0000	-	-
		12	0,1762	4,4507	90	0,0696	3,2455	0,2886	3,5342	2	76,709
		13	0,1787	4,4408	77	0,0676	3,2434	0,4686	3,7120	2	85,601
		14	0,1793	4,4289	95	0,0556	3,2278	0,6123	3,8401	3	28,004
		15	0,1753	4,4179	107	0,0551	3,1903	0,2786	3,4689	4	13,278
		16	0,1816	4,4104	86	0,0538	3,2209	0,1721	3,3929	4,74	28,419
Plano 4	May-93	18	0,1817	1,9252	83	0,0680	1,4262	0,0843	1,5105	0,62	143,631
		9	0,1646	1,8904	88	0,0513	1,2907	0,1527	1,4434	0,5	188,682
		8	0,1288	1,8374	90	0,0902	1,1121	0,3880	1,5000	2	25,000
		7	0,1763	1,8200	90	0,0383	1,2848	0,2143	1,4991	1	49,907
		1	0,1730	2,8648	85	0,0489	2,0144	0,5268	2,5412	0,35	626,068
		2	0,1786	2,8786	75	0,0498	2,0605	0,1308	2,1913	2	9,567
		22	0,1595	-	70	0,1481	-	-	-	-	-
Plano 5	Nov-93	11	0,1733	5,5958	90	0,0261	3,8560	0,2666	4,1226	12	65,645
		12	0,1769	5,5876	90	0,0217	3,8864	0,3625	4,2489	12	64,592
		16	0,1744	5,5446	88	0,0319	3,8570	0,2133	4,0703	5	18,594
		17	0,1808	5,5407	90	0,0204	3,9043	0,2769	4,1812	5	16,377
Plano 6	Ene-94	26	0,1880	4,5994	90	0,0408	3,3982	0,1351	3,5332	1	253,324
		25	0,1915	4,5903	90	0,0619	3,5092	0,2084	3,7176	5	25,648
		24	0,1967	4,5820	75	0,1022	3,7023	0,1799	3,8823	7	44,539

		11	0,1941	4,5717	90	0,0761	3,5818	0,2787	3,8605	7	44,850
Plano 6		12	0,1961	4,5609	90	0,0787	3,6070	0,3946	4,0016	7,75	48,367
		13	0,1961	4,5485	75	0,1111	3,7046	0,6150	4,3196	6	28,006
		14	0,1921	4,5311	95	0,0618	3,4797	0,8751	4,3548	5	12,904
		15	0,2082	4,5189	75	0,1150	3,8472	0,6592	4,5064	5	9,873
		16	0,1945	4,5088	96	0,0500	3,4505	0,3430	3,7935	6	36,775
Plano 8	Oct-95	16	0,1730	4,7103	50	0,0419	3,2435	0,1078	3,3513	2	67,567
		29	0,1696	-	93	0,0176	-	-	-	-	-
		30	0,1716	4,6932	104	0,0317	3,2555	0,1665	3,4220	0,35	877,720
Plano 9	Oct-95	33	0,1863	3,5000	97	0,0395	2,5756	0,0993	2,6749	4	33,127
Plano 10	Jun-96	25	0,1516	-	94	0,0682	-	-	-	-	-
		24	0,1563	-	110	0,1250	-	-	-	-	-
		12	0,1554	-	117	0,1194	-	-	-	-	-
		13	0,1599	-	95	0,1642	-	-	-	-	-
		27	0,1740	5,5426	76	0,0343	3,8390	0,1553	3,9943	1	299,426

Socavación grupal con la ecuación No.2 autor: Ahmad

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	S/L	Z Grupo	Z Medida en el plano	% Error
Plano 6	Ene-94	26	0	-	0	1	100
		25	0,333	5,0000	0,333	5	93,338
		24	1,495	3,5833	1,495	7	78,638
		11	1,034	2,2105	1,034	7	85,228
		12	0,739	3,4286	0,3929	7,75	94,930
		13	0,145	4,2857	0,1729	6	97,119
		14	0,702	3,9000	0,0714	5	98,572
		15	1,905	5,7273	0,0386	5	99,228
		16	2,321	3,4615	0,0148	6	99,754

Socavación grupal con la ecuación No.2 autor: Ahmad + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	Z Contracción	Z Total	S/L	Z Grupo	Z Medida en el plano	% Error
Plano 6	Ene-94	26	0,000	0,135	0,135		0,135	1	86,493
		25	0,333	0,208	0,541	5,0000	0,541	5	89,171
		24	1,495	0,180	1,675	3,5833	1,675	7	76,067
		11	1,034	0,279	1,313	2,2105	1,313	7	81,246
		12	0,739	0,395	1,134	3,4286	0,499	7,75	93,563
		13	0,145	0,615	0,760	4,2857	0,219	6	96,342
		14	0,702	0,875	1,577	3,9000	0,091	5	98,187
		15	1,905	0,659	2,565	5,7273	0,049	5	99,019
		16	2,321	0,343	2,664	3,4615	0,019	6	99,688

Socavación grupal con la ecuación No.4 autor: Garde

Plano	Fecha	No. Espolón	Z				S/L	Z Grupo				Z Medida en plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 6	Ene-94	26	1,3914	1,0555	1,0975	0,8189		1,3914	1,0555	1,0975	0,8189	1	5,549
		25	1,6089	1,2676	1,3132	1,0276	5,0000	1,6089	1,2676	1,3132	1,0276	5	67,823
		24	2,0221	1,6687	1,7208	1,4207	3,5833	2,0221	1,6687	1,7208	1,4207	7	71,113
		11	1,7656	1,4217	1,4701	1,1801	2,2105	1,7656	1,4217	1,4701	1,1801	7	74,777
		12	1,8281	1,4850	1,5350	1,2442	3,4286	0,671	0,540	0,559	0,448	7,75	91,343
		13	2,0573	1,7027	1,7544	1,4538	4,2857	0,295	0,238	0,246	0,197	6	95,080
		14	1,6031	1,2665	1,3120	1,0298	3,9000	0,122	0,098	0,102	0,081	5	97,562
		15	2,3877	2,0403	2,1025	1,7980	5,7273	0,066	0,053	0,055	0,044	5	98,681
		16	1,5796	1,2499	1,2966	1,0184	3,4615	0,025	0,020	0,021	0,017	6	99,580

Socavación grupal con la ecuación No.4 autor: Garde + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z Total				S/L	Z GRUPO				Z Medida en plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		D50=0,4mm	D50=0,5mm	D50=0,6mm	D50=0,7mm		
Plano 6	Ene-94	26	1,5265	1,1906	1,2326	0,9540		1,5265	1,1906	1,2326	0,9540	1	4,60
		25	1,8173	1,4760	1,5216	1,2360	5,00	1,8173	1,4760	1,5216	1,2360	5	63,65
		24	2,2020	1,8486	1,9007	1,6006	3,58	2,2020	1,8486	1,9007	1,6006	7	68,54
		11	2,0443	1,7004	1,7488	1,4589	2,21	2,0443	1,7004	1,7488	1,4589	7	70,80
		12	2,2227	1,8796	1,9296	1,6388	3,43	0,777	0,646	0,665	0,554	7,75	89,98
		13	2,6723	2,3177	2,3694	2,0687	4,29	0,342	0,284	0,292	0,244	6	94,30
		14	2,4781	2,1415	2,1871	1,9049	3,90	0,141	0,117	0,121	0,101	5	97,18
		15	3,0469	2,6996	2,7617	2,4572	5,73	0,076	0,064	0,065	0,054	5	98,47
		16	1,9226	1,5929	1,6396	1,3614	3,46	0,029	0,024	0,025	0,021	6	99,51

socavación grupal con la ecuación No.6 autor: Das

Plano	Fecha	No. Espolón	Z				S/L	Z Grupo				Z Medida en plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 6	Ene-94	26	4,6640	4,0836	3,6364	3,2763		4,6640	4,0836	3,6364	3,2763	1	227,634
		25	5,0691	4,4638	3,9976	3,6221	5,0000	5,0691	4,4638	3,9976	3,6221	5	1,382
		24	5,8464	5,1930	4,6896	4,2842	3,5833	5,8464	5,1930	4,6896	4,2842	7	16,480
		11	5,3449	4,7235	4,2448	3,8593	2,2105	5,3449	4,7235	4,2448	3,8593	7	23,645
		12	5,4444	4,8175	4,3345	3,9456	3,4286	2,031	1,795	1,613	1,467	7,75	73,793
		13	5,8832	5,2295	4,7259	4,3205	4,2857	0,894	0,790	0,710	0,645	6	85,106
		14	4,9931	4,3963	3,9366	3,5664	3,9000	0,369	0,326	0,293	0,266	5	92,618
		15	6,4239	5,7382	5,2099	4,7846	5,7273	0,200	0,176	0,159	0,144	5	96,007
		16	4,9029	4,3131	3,8588	3,4930	3,4615	0,076	0,067	0,061	0,055	6	98,728

socavación grupal con la ecuación No.6 autor: Das + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z Total				S/L	Z Grupo				Z Medida en plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		D50=0,4mm	D50=0,5mm	D50=0,6mm	D50=0,7mm		
Plano 6	Ene-94	26	4,7991	4,2186	3,7715	3,4114		4,7991	4,2186	3,7715	3,4114	1	241
		25	5,2775	4,6722	4,2059	3,8305	5,00	5,2775	4,6722	4,2059	3,8305	5	5,6
		24	6,0264	5,3729	4,8695	4,4641	3,58	6,0264	5,3729	4,8695	4,4641	7	13,9
		11	5,6236	5,0022	4,5235	4,1380	2,21	5,6236	5,0022	4,5235	4,1380	7	19,7
		12	5,8390	5,2121	4,7291	4,3402	3,43	2,137	1,901	1,719	1,572	7,75	72,4
		13	6,4982	5,8445	5,3409	4,9355	4,29	0,940	0,836	0,756	0,692	6	84,3
		14	5,8682	5,2714	4,8116	4,4414	3,90	0,388	0,345	0,312	0,286	5	92,2
		15	7,0831	6,3974	5,8691	5,4438	5,73	0,210	0,187	0,169	0,155	5	95,8
		16	5,2459	4,6561	4,2018	3,8360	3,46	0,080	0,071	0,065	0,059	6	98,7

socavación grupal con la ecuación No.7 autor: Neill

Plano	Fecha	No. Espolón	Z con 2,1 d50				Z con 2,75 d50				S / L	Z Grupo con 2,1 d50				Z Grupo con 2,75 d50				Z Medida en plano	% Error
			0,4mm	0,5mm	0,6mm	0,7mm	0,4mm	0,5mm	0,6mm	0,7mm		0,4mm	0,5mm	0,6mm	0,7mm	0,4mm	0,5mm	0,6mm	0,7mm		
			Plano 6	Ene-94	26	3,127	2,946	2,802	2,682	5,518		5,282	5,093	4,936		3,13	2,946	2,802	2,682		
		25	4,233	4,027	3,863	3,726	6,964	6,695	6,479	6,300	5,0	4,23	4,027	3,863	3,726	6,964	6,695	6,479	6,300	5	2,6
		24	6,308	6,053	5,850	5,681	9,678	9,345	9,079	8,858	3,6	6,31	6,053	5,850	5,681	9,678	9,345	9,079	8,858	7	3,7
		11	5,474	5,239	5,051	4,896	8,583	8,276	8,030	7,826	2,2	5,47	5,239	5,051	4,896	8,583	8,276	8,030	7,826	7	4,4
		12	4,937	4,715	4,538	4,391	7,877	7,587	7,354	7,162	3,4	2,08	1,99	1,92	1,86	3,26	3,14	3,05	2,97	7,75	57,9
		13	3,863	3,667	3,510	3,379	6,467	6,210	6,004	5,833	4,3	0,92	0,88	0,84	0,82	1,44	1,38	1,34	1,31	6	76,1
		14	4,848	4,629	4,453	4,308	7,751	7,464	7,234	7,044	3,9	0,38	0,36	0,35	0,34	0,59	0,57	0,55	0,54	5	88,1
		15	6,992	6,723	6,508	6,329	10,55	10,20	9,92	9,69	5,7	0,20	0,20	0,19	0,18	0,32	0,31	0,30	0,29	5	93,6
		16	7,727	7,441	7,213	7,023	11,51	11,14	10,84	10,59	3,5	0,08	0,07	0,07	0,07	0,12	0,12	0,11	0,11	6	98,0

socavación grupal con la ecuación No.7 autor: Neill + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z Total con 2,1				Z Total con 2,75				S / L	Z Grupo con 2,1				Z Grupo con 2,75				Z Medida en plano	% Error
			d50 mm				d50 mm					d50 mm				d50 mm					
			0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,7		0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,7		
Plano 6	Ene-94	26	3,26	3,1	2,9	2,8	5,7	5,4	5,2	5,1		3,26	3,08	2,94	2,82	5,65	5,42	5,23	5,07	1	182
		25	4,44	4,2	4,1	3,9	7,2	6,9	6,7	6,5	5,0	4,44	4,24	4,07	3,93	7,17	6,90	6,69	6,51	5	3,4
		24	6,49	6,2	6,0	5,9	9,9	9,5	9,3	9,0	3,6	6,49	6,23	6,03	5,86	9,86	9,53	9,26	9,04	7	1,3
		11	5,75	5,5	5,3	5,2	8,9	8,6	8,3	8,1	2,2	5,75	5,52	5,33	5,17	8,86	8,55	8,31	8,10	7	4,7
		12	5,33	5,1	4,9	4,8	8,3	8,0	7,7	7,6	3,4	2,19	2,10	2,03	1,97	3,37	3,25	3,16	3,08	7,75	56,6
		13	4,48	4,3	4,1	4,0	7,1	6,8	6,6	6,4	4,3	0,96	0,92	0,89	0,87	1,48	1,43	1,39	1,36	6	75,3
		14	5,72	5,5	5,3	5,2	8,6	8,3	8,1	7,9	3,9	0,40	0,38	0,37	0,36	0,61	0,59	0,57	0,56	5	87,8
		15	7,65	7,4	7,2	7,0	11,2	10,9	10,6	10,3	5,7	0,21	0,21	0,20	0,19	0,33	0,32	0,31	0,30	5	93,4
		16	8,07	7,8	7,6	7,4	11,9	11,5	11,2	10,9	3,5	0,08	0,08	0,08	0,07	0,13	0,12	0,12	0,12	6	97,9

Socavación grupal con la ecuación No.8 autor: Buy Ngok

Plano	Fecha	No. Espolón	Z				S/L	Z Grupo				Z Medida en plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		
Plano 6	Ene-94	26	1,6911	1,3384	1,3825	1,0900		1,6911	1,3384	1,3825	1,0900	1	9,001
		25	1,8239	1,4708	1,5180	1,2225	5,0000	1,8239	1,4708	1,5180	1,2225	5	63,521
		24	1,8118	1,4697	1,5201	1,2296	3,5833	1,8118	1,4697	1,5201	1,2296	7	74,117
		11	1,9265	1,5739	1,6234	1,3262	2,2105	1,9265	1,5739	1,6234	1,3262	7	72,479
		12	1,9839	1,6324	1,6836	1,3857	3,4286	0,732	0,598	0,617	0,504	7,75	90,554
		13	1,8214	1,4794	1,5293	1,2394	4,2857	0,322	0,263	0,271	0,222	6	94,631
		14	1,9194	1,5654	1,6133	1,3166	3,9000	0,133	0,109	0,112	0,092	5	97,339
		15	2,1382	1,8034	1,8633	1,5698	5,7273	0,072	0,059	0,061	0,050	5	98,561
		16	1,9765	1,6253	1,6751	1,3787	3,4615	0,028	0,022	0,023	0,019	6	99,541

Socavación grupal con la ecuación No.8 autor: Buy Ngok + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z Total				S/L	Z GRUPO				Z Medida en plano	% Error
			d50=0,4mm	d50=0,5mm	d50=0,6mm	d50=0,7mm		D50=0,4mm	D50=0,5mm	D50=0,6mm	D50=0,7mm		
Plano 6	Ene-94	26	1,8262	1,4735	1,5176	1,2251		1,8262	1,4735	1,5176	1,2251	1	22,508
		25	2,0323	1,6792	1,7264	1,4309	5,0000	2,0323	1,6792	1,7264	1,4309	5	59,353
		24	1,9918	1,6496	1,7001	1,4096	3,5833	1,9918	1,6496	1,7001	1,4096	7	71,546
		11	2,2052	1,8526	1,9022	1,6049	2,2105	2,2052	1,8526	1,9022	1,6049	7	68,497
		12	2,3785	2,0270	2,0782	1,7803	3,4286	0,838	0,704	0,723	0,610	7,75	89,187
		13	2,4364	2,0944	2,1443	1,8544	4,2857	0,369	0,310	0,318	0,268	6	93,855
		14	2,7944	2,4405	2,4884	2,1916	3,9000	0,152	0,128	0,131	0,111	5	96,954
		15	2,7974	2,4626	2,5225	2,2290	5,7273	0,082	0,069	0,071	0,060	5	98,353
		16	2,3195	1,9683	2,0180	1,7217	3,4615	0,031	0,026	0,027	0,023	6	99,475

Socavación grupal ecuación No.9 autor: Liu

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	S/L	Z Grupo	Z Medida en plano	% Error
Plano 6	Ene-94	26	3,1081		3,1081	1	210,808
		25	3,6727	5,0000	3,6727	5	26,546
		24	4,4487	3,5833	4,4487	7	36,447
		11	3,9146	2,2105	3,9146	7	44,077
		12	3,9219	3,4286	1,488	7,75	80,806
		13	4,5163	4,2857	0,655	6	89,091
		14	3,5233	3,9000	0,270	5	94,594
		15	3,8620	5,7273	0,146	5	97,076
		16	2,5735	3,4615	0,056	6	99,068

Socavación grupal ecuación No.9 autor: Liu + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	Z Contracción	Z Total	S/L	Z Grupo	Z Medida en plano	% Error
Plano 6	Ene-94	26	3,1081	0,1351	3,2431		3,2431	1	224,315
		25	3,6727	0,2084	3,8811	5,0000	3,8811	5	22,378
		24	4,4487	0,1799	4,6286	3,5833	4,6286	7	33,876
		11	3,9146	0,2787	4,1933	2,2105	4,1933	7	40,095
		12	3,9219	0,3946	4,3165	3,4286	1,593	7,75	79,439
		13	4,5163	0,6150	5,1313	4,2857	0,701	6	88,315
		14	3,5233	0,8751	4,3983	3,9000	0,290	5	94,209
		15	3,8620	0,6592	4,5213	5,7273	0,157	5	96,867
		16	2,5735	0,3430	2,9164	3,4615	0,060	6	99,002

Socavación grupal ecuación No.10 autor: Richardson

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	S/L	Z Grupo	Z Medida en plano	% Error
PLANO 6	Ene-94	26	10,599		4,6640	1	366,405
		25	10,641	5,0000	5,0691	5	1,382
		24	10,717	3,5833	5,8464	7	16,480
		11	10,646	2,2105	5,3449	7	23,645
		12	10,656	3,4286	2,031	7,75	73,793
		13	10,628	4,2857	0,894	6	85,106
		14	10,515	3,9000	0,369	5	92,618
		15	10,769	5,7273	0,200	5	96,007
		16	10,507	3,4615	0,076	6	98,728

Socavación grupal ecuación No.10 autor: Richardson + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	Z Contracción	Z Total	S/L	Z Grupo	Z Medida en plano	% Error
Plano 6	Ene-94	26	10,599	0,135	10,734		10,734	1	973,416
		25	10,641	0,208	10,849	5,0000	10,849	5	116,986
		24	10,717	0,180	10,897	3,5833	10,897	7	55,675
		11	10,646	0,279	10,925	2,2105	10,925	7	56,073
		12	10,656	0,395	11,051	3,4286	4,152	7,75	46,432
		13	10,628	0,615	11,243	4,2857	1,827	6	69,555
		14	10,515	0,875	11,390	3,9000	0,754	5	84,912
		15	10,769	0,659	11,428	5,7273	0,408	5	91,839
		16	10,507	0,343	10,850	3,4615	0,156	6	97,400

Socavación grupal ecuación No.11 autor: Zagloul

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	S/L	Z Grupo	Z Medida en plano	% Error
PLANO 6	Ene-94	26	3,3982		3,3982	1	239,817
		25	3,5092	5,0000	3,5092	5	29,816
		24	3,7023	3,5833	3,7023	7	47,109
		11	3,5818	2,2105	3,5818	7	48,832
		12	3,6070	3,4286	1,361	7,75	82,438
		13	3,7046	4,2857	0,599	6	90,019
		14	3,4797	3,9000	0,247	5	95,053
		15	3,8472	5,7273	0,134	5	97,324
		16	3,4505	3,4615	0,051	6	99,148

Socavación grupal ecuación No.11 autor: Zagloul + socavación por contracción

Plano	Fecha	No. Espolón	Z	Z Contracción	Z Total	S/L	Z Grupo	Z Medida en plano	% Error
Plano 6	Ene-94	26	3,3982	0,1351	3,5332		3,5332	1	253,324
		25	3,5092	0,2084	3,7176	5,0000	3,7176	5	25,648
		24	3,7023	0,1799	3,8823	3,5833	3,8823	7	44,539
		11	3,5818	0,2787	3,8605	2,2105	3,8605	7	44,850
		12	3,6070	0,3946	4,0016	3,4286	1,467	7,75	81,071
		13	3,7046	0,6150	4,3196	4,2857	0,645	6	89,242
		14	3,4797	0,8751	4,3548	3,9000	0,267	5	94,668
		15	3,8472	0,6592	4,5064	5,7273	0,144	5	97,116
		16	3,4505	0,3430	3,7935	3,4615	0,055	6	99,081

