

ACTA

El día 6 de noviembre del 2009 se reunió el jurado formado por los profesores:

Pérez H. David
Bello, M. María
Falcón, Marco

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: “**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE PRESAS CERRADAS PARA LA RETENCIÓN DE SEDIMENTOS EN RÍOS DE MONTAÑA**”. Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO HIDROMETEOROLOGISTA**.

Una vez oída la defensa oral que el bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió la siguiente calificación:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. JESÚS MANUEL GARCÍA GARCÉS	19	DIECINUEVE

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

Caracas, 6 de noviembre del 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANALISIS EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE
PRESAS CERRADAS PARA LA RETENCION DE SEDIMENTOS
EN RIOS DE MONTAÑA**

TUTOR ACADEMICO: Prof. José Luis López

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el bachiller
García Garcés, Jesús Manuel
Para optar al Título de
Ingeniero Hidrometeorologista**

Caracas, 2009

DEDICATORIA

A mi madre Gloria, por su amor apoyo incondicional y su sacrificio por sacarme adelante.

A la memoria de mi padre Jesús, que siempre lo llevo en mi mente y mi corazón y es mi modelo a seguir siempre.

A mi hermano Elber, por darme el ánimo y fuerza para graduarme de ingeniero.

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Proyecto G-2005000507, titulado: “EVALUACION DE OBRAS DE CONTROL PARA ALUDES TORRENCIALES Y DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN SUS PROXIMIDADES”, financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT).

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. José Luis López, por su orientación en la realización de esta investigación.

A la Prof. Marielena Bello, por su apoyo, colaboración, orientación en todas las etapas del desarrollo de esta investigación.

Al Prof. José de Jesús Gaspar, por su confianza y apoyo para la realización de esta investigación.

A Caudex Vitelio Peñaranda, por su colaboración, apoyo, valiosos consejos en el desarrollo de este trabajo.

A Boris González y Douglas Verde, por su colaboración en la realización de los ensayos experimentales.

A María Ramos, por su apoyo y estímulo todo el tiempo y su colaboración en la revisión de la redacción de este trabajo.

Al personal del taller del Instituto de Mecánica de los Fluidos (IMF), por su colaboración en todo lo referente a construcción e instalación del canal experimental para los ensayos.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron con este gran logro.

García G. Jesús M.

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE
PRESAS CERRADAS PARA LA RETENCIÓN DE SEDIMENTOS
EN RÍOS DE MONTAÑA.**

Tutor Académico: Prof. José Luis López.

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2009, n° pág (310).

Palabras Claves: Flujo, canal, sedimento, pendiente de compensación, presa, vertedero, erosión, sedimentación, capacidad de transporte, caudal, arena.

Resumen. Este trabajo se orientó en el análisis experimental del funcionamiento de presas cerradas con y sin vertedero para la retención de sedimentos no cohesivos (arena), simulando el comportamiento de ríos de montaña. Con este fin se efectuaron ensayos en un canal de laboratorio de pendiente fuerte a fin de observar y estudiar el comportamiento de este tipo de presas, similares a las que se están construyendo hoy día en el Estado Vargas. Los ensayos se realizaron para diversas pendientes y concentraciones de sedimento vertido, a fin de estudiar el desempeño de las presas tomando en cuenta la variación espacial y temporal del lecho, la pendiente de compensación aguas arriba de la presa, análisis granulométricos, caudal sedimentado y degradado del lecho y otros aspectos resaltantes del proceso de sedimentación y degradación.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	9
INDICE TABLAS.....	15
INDICE DE ANEXOS.....	16
1. INTRODUCCION	18
1.1. MOTIVACIÓN	18
1.2. EL PROBLEMA.....	19
1.3. OBJETIVOS.....	21
1.4. ANTECEDENTES	22
2. MARCO TEORICO	28
2.1. TORRENTES.....	28
2.2. PARTES DE UN TORRENTE	29
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS TORRENTES Y MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN.....	30
2.3.1. <i>Torrentes depositantes</i>	31
2.3.2. <i>Torrentes socavantes</i>	32
2.4. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA RESPUESTA DEL CAUCE FLUVIAL. ECUACIÓN DE LANE.....	34
2.5. ASPECTOS GENERALES DEL FLUJO CON SUPERFICIE LIBRE	36
2.5.1. <i>Tipos de flujo</i>	36
2.5.2. <i>Flujo gradualmente variado</i>	37
2.5.2.1. Hipótesis básicas	37
2.5.2.2. Ecuación dinámica del flujo gradualmente variado	38
2.5.2.3. Características de los perfiles de flujo	43
2.5.2.4. Clasificación de los perfiles de flujo.....	48
2.5.3. <i>Resalto hidráulico</i>	50
2.5.3.1. Resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales.....	50
2.5.3.2. Tipos de resaltos hidráulicos	52
2.5.3.3. Longitud del salto.....	53
2.5.3.4. Localización del resalto hidráulico	54
2.5.4. <i>Programa para el cálculo de perfiles de agua en canales abiertos</i>	57
2.5.4.1. Ecuación de la energía	58
2.5.4.2. Canales prismáticos.....	59
2.5.4.3. Algoritmos de cálculo	62
2.5.4.3.1. Método de Newton	63
2.5.4.4. Valores iniciales	65
2.5.4.5. Controles hidráulicos	66
2.5.4.6. Ejemplos de aplicación en canales de geometría regular	67
2.5.4.6.1. Flujo supercrítico en un canal prismático de pendiente suave.....	68
2.5.4.6.2. Flujo supercrítico en un canal prismático de pendiente fuerte	70
2.5.4.6.3. Datos de entrada.....	71
2.5.4.6.3.1. Lectura del disco duro.....	71
2.5.4.6.3.2. Lectura por pantalla	74

2.6.	PENDIENTE DE COMPENSACIÓN.....	74
2.6.1.	<i>Fórmula de Romiti</i>	75
2.6.2.	<i>Experiencia japonesa</i>	75
2.6.3.	<i>Experiencia italiana</i>	75
2.6.4.	<i>Experiencia norteamericana</i>	76
2.6.5.	<i>Suárez</i>	76

3. MARCO METODOLOGICO 77

3.1.	ALCANCES.....	77
------	---------------	----

4. MARCO EXPERIMENTAL 80

4.1.	CANAL DE ENSAYO PARA FLUJO TORRENCIAL.....	80
4.1.1.	<i>Granulometría del material utilizado para adecuar el fondo del canal experimental</i> ..	81
4.2.	TOLVA DE ALIMENTACIÓN.....	81
4.2.1.	<i>Calibración de la tolva de sedimentos</i>	82
4.3.	GRANULOMETRÍA DEL SEDIMENTO UTILIZADO.....	82
4.4.	ENSAYOS REALIZADOS EN EL CANAL DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
4.4.1.	<i>Pendiente 5%</i>	87
4.4.1.1.	Ensayo 1: Cerrada sin vertedero.....	87
4.4.1.2.	Ensayo 2: Cerrada sin vertedero. Aguas claras.....	93
4.4.1.3.	Ensayo 3: Cerrada con vertedero.....	99
4.4.1.4.	Ensayo 4: Cerrada con vertedero. Aguas claras.....	105
4.4.2.	<i>Pendiente 7,5%</i>	110
4.4.2.1.	Ensayo 5: Cerrada sin vertedero.....	110
4.4.2.2.	Ensayo 6: Cerrada sin vertedero. Aguas claras.....	115
4.4.2.3.	Ensayo 7: Cerrada con vertedero.....	120
4.4.2.4.	Ensayo 8: Cerrada con vertedero. Aguas claras.....	125
4.4.2.5.	Ensayo 9: Cerrada sin vertedero.....	130
4.4.3.	<i>Pendiente 10%</i>	135
4.4.3.1.	Ensayo 10: Cerrada sin vertedero.....	135
4.4.3.2.	Ensayo 11: Cerrada sin vertedero. Aguas claras.....	140
4.4.3.3.	Ensayo 12: Cerrada con vertedero.....	145
4.4.3.4.	Ensayo 13: Cerrada con vertedero. Aguas claras.....	150
4.4.3.5.	Ensayo 14: Cerrada con vertedero.....	155
4.4.3.6.	Ensayo 15: Cerrada con vertedero. Aguas claras.....	160
4.5.	COMPARACIÓN DE PERFILES MEDIDOS Y PERFILES CALCULADOS DE LA SUPERFICIE INICIAL DEL AGUA.....	165
4.5.1.	<i>Pendiente 5%</i> :.....	165
4.5.1.1.1.	<i>Ensayo 1 con presa cerrada</i>	166
4.5.1.1.2.	<i>Ensayo 3 con presa con vertedero</i>	166
4.5.2.	<i>Pendiente 7,5%</i> :.....	167
4.5.2.1.1.	<i>Ensayo 5 con presa sin vertedero</i>	167
4.5.2.1.2.	<i>Ensayo 7 con presa con vertedero</i>	168
4.5.3.	<i>Pendiente 10%</i>	169
4.5.3.1.1.	<i>Ensayo 10 con presa sin vertedero</i>	169
4.5.3.1.2.	<i>Ensayo 12 con presa con vertedero</i>	170
4.5.3.1.3.	<i>Ensayo 14 con presa con vertedero</i>	170

5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	172
5.1.	PERFILES DEL LECHO SEDIMENTADO POR EFECTO DE LA PRESA	172
5.1.1.	<i>Sedimentación por efecto de la presa</i>	172
5.1.1.1.	<i>Formación del lecho sedimentado</i>	172
5.1.1.2.	<i>Caudal sólido sedimentado y caudal unitario</i>	172
5.1.1.3.	<i>Pendiente de compensación o equilibrio</i>	172
5.1.1.4.	<i>Angulo que forma el frente de onda del delta</i>	174
5.1.1.5.	<i>Velocidad de propagación del delta</i>	174
5.1.1.6.	<i>Granulometría</i>	175
5.1.2.	<i>Degradación del lecho por acción del flujo con aguas claras</i>	175
5.1.2.1.	<i>Degradación del lecho sedimentado</i>	175
5.1.2.2.	<i>Caudal sólido sedimentado y caudal unitario</i>	176
5.1.2.3.	<i>Pendiente de compensación o equilibrio</i>	176
5.1.2.4.	<i>Granulometría</i>	176
5.2.	COMPARACIÓN DE PERFILES DE AGUA INICIAL MEDIDOS Y CALCULADOS MEDIANTE EL PROGRAMA “PERFIL”	176
5.2.1.	<i>Pendiente de 5%</i>	176
5.2.1.1.	<i>Ensayo 1. Presa cerrada</i>	176
5.2.1.2.	<i>Ensayo 3. Presa con vertedero</i>	177
5.2.2.	<i>Pendiente 7.5%</i>	177
5.2.2.1.	<i>Ensayo 5. Presa sin vertedero</i>	178
5.2.2.2.	<i>Ensayo 7. Presa con vertedero</i>	178
5.2.3.	<i>Pendiente 10%</i>	178
5.2.3.1.	<i>Ensayo 10. Presa sin vertedero</i>	178
5.2.3.2.	<i>Ensayo 12. Presa con vertedero</i>	178
5.2.3.3.	<i>Ensayo 14. Presa con vertedero</i>	178
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	179
6.1.	CONCLUSIONES	179
6.2.	RECOMENDACIONES	183
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	184

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfiles del cauce de la quebrada Piedra Azul en los tramos aguas arriba de las presas. Tomado de López y otros (2007).....	20
Figura 2.- Vista desde aguas abajo de la presa # 2 en quebrada Piedra Azul. Foto izquierda tomada en marzo 2005 y foto derecha en abril 2007, observándose un descenso del lecho de unos 3m aproximadamente al pié del contradique. Tomado de López y otros (2007).	20
Figura 3. Partes de un torrente. Tomado de Suárez (1993).....	29
Figura 4. Estabilización de un torrente con presas escalonadas. Tomado de Suárez (1993).	33
Figura 5. Comparación entre presas y umbrales de fondo. Tomado de Suárez (1993).....	34
Figura 6. Analogía de la balanza de Lane. Tomado de Vide (2002).	35
Figura 7. Basculamiento del fondo con erosión (1) y con sedimentación (2) Tomado de Vide (2002).....	36
Figura 8. Derivación de la ecuación del flujo gradualmente variado. Tomado de Chow (2000).	40
Figura 9. Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado. Tomado de Chow (2000).	47
Figura 10. Relación entre f_1 y y_2/y_1 para el resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal. Tomado de Chow (2000).	51
Figura 11. Tipos de resaltos hidráulicos. Tomado de Chow (2000).	53
Figura 12. Gráfico de longitud en términos de profundidad secunte y_2 de resaltos en canales horizontales. Tomado de Chow (2000).	54
Figura 13. Localización del resalto hidráulico. Tomado de Chow (2000).	55
Figura 14. Diagrama de definición de términos del flujo gradualmente variado en canales abiertos. Tomado de López (1998).....	59
Figura 15. Algoritmo de Newton. Tomado de López (1998).	65
Figura 16. Ejemplos de secciones de control. Tomado de López (1998).	67
Figura 17. Perfil tipo M1. Tomado de López (1998).....	69
Figura 18. Perfil tipo M3. Tomado de López (1998).....	69

Figura 19. Perfil tipo S2. Tomado de López (1998).	71
Figura 20. Esquema que presenta la distribución de los 15 experimentos	77
Figura 21. Foto del canal de laboratorio donde puede apreciarse: (1) pivote que permite graduar la pendiente. (2) Ajuste del ancho mediante la instalación de una margen derecha en madera. (3) Instalación del dique (presa) transverso a la corriente. (4) Obtención de la pendiente final en una experiencia, después de la sedimentación del lecho.	80
Figura 22. Distribución granulométrica del triturado para la adecuación del fondo del canal.	82
Figura 23. Esquema que ilustra la tolva con válvula reguladora (para graduar la salida de la arena) que fue utilizada en los experimentos y el proceso que permitió el paso de un gasto sólido inferior a la capacidad de arrastre.	85
Figura 24. Distribución granulométrica del material del canal de laboratorio, del martes 17 de junio de 2008, IMF de la UCV.	85
Figura 25. Análisis granulométrico realizado al ensayo 1. Todas las medidas con las que se hicieron las mediciones están tomadas de la presa hacia aguas arriba.	89
Figura 26. Variación espacial y temporal del perfil del delta observado en el ensayo 1, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (f00:04:30) y su avance en el tiempo hasta el perfil de equilibrio (f00:52:30).	90
Figura 27. Variación del perfil del delta observado en el ensayo 1, donde se aprecia la condición inicial y final.	91
Figura 28. Variación del perfil de niveles del agua observados en el ensayo 1, donde se aprecia la condición inicial y final.	92
Figura 29. Foto donde se muestra el efecto de erosión en la parte central del canal y hacia las márgenes erosión nula. Forma de herradura.	94
Figura 30. Imagen ilustrativa de la forma de cuña de fondo como resultado del momento en que se alcanzó el equilibrio en el canal.	95
Figura 31. Variación espacial y temporal del perfil del delta observado en el ensayo 2, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (fondo inicial) y su avance en el tiempo hasta el perfil de equilibrio (f20:00:00).	96
Figura 32. Perfiles inicial y final del nivel del delta referente al ensayo 2.	97
Figura 33. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 2, se aprecia la variación del perfil de niveles de agua inicial y final.	98
Figura 34. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 3.	100

Figura 35. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 3, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (f00:08:00) y su avance hasta el perfil de equilibrio (f00:38:00).....	101
Figura 36a (izquierda). Imagen del ensayo donde se muestra el efecto generado por los vórtices en los laterales del vertedero en la presa; lo cual genera en el frente del perfil una pendiente constante debido a la socavación del lecho en las cercanías de la presa.	102
Figura 36b (derecha). Vista de planta del efecto generado por los vórtices presentes en los laterales de la presa con vertedero sobre el lecho. Socavación permanente.....	102
Figura 37. Perfiles inicial y final del nivel del delta referente al ensayo 3.....	103
Figura 38. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 3.....	104
Figura 39. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 4, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (f00:02:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (f00:24:00).....	107
Figura 40. Perfiles inicial y final del nivel del delta referente al ensayo 4.....	108
Figura 41. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 4.....	109
Figura 42. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada aguas arriba para el ensayo 5.....	111
Figura 43. Variación espacial y temporal del lecho de fondo observado en el ensayo 5, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (f00:03:27) y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio (f00:23:04).....	112
Figura 44. Perfiles de los niveles del lecho referentes al ensayo 5.....	113
Figura 45. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 5, se aprecia la variación del perfil de agua inicial y final.....	114
Figura 46. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 6, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (f00:02:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (f40:00:00).....	117
Figura 47. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 6.....	118

Figura 48. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 6, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.....	119
Figura 49. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 7, donde se aprecia la formación desde el primer perfil y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio.....	122
Figura 50. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 7.....	123
Figura 51. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 7.....	124
Figura 52. Variación espacial y temporal del perfil del lecho en el ensayo 8, donde se aprecia el efecto gradual de la degradación del lecho del canal desde el momento de inicio (f00:01:30) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio	127
Figura 53. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 8.....	128
Figura 54. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 8.....	129
Figura 55. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 9.....	131
Figura 56. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 9, donde se aprecia la formación desde el primer perfil y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio.....	132
Figura 57. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 9.....	133
Figura 58. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 9, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.....	134
Figura 59. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 10.	136
Figura 60. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 10, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (f00:03:00) y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio (f00:22:00).....	137
Figura 61. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 10.	138
Figura 62. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 10, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final, también se aprecia que se disipa el resalto hidráulico.....	139

Figura 63. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 11, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del lecho del canal desde el momento de inicio (f ini) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (f30:00:00).	142
Figura 64. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 11.	143
Figura 65. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 11, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.	144
Figura 66. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 12.	146
Figura 67. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 12, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (f00:03:00) y su avance hasta el perfil de equilibrio (f00:25:00).	147
Figura 68. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 12.	148
Figura 69. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 12, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.	149
Figura 70. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 13, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (f00:01:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (f00:16:00).	152
Figura 71. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 13.	153
Figura 72. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 13, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.	154
Figura 73. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 14.	156
Figura 74. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 14, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (f00:02:20) y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio (f00:02:30).	157
Figura 75. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 14.	158
Figura 76. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 14, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.	159

Figura 77. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 15.....	161
Figura 78. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 15, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (f00:02:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (f00:09:00).....	162
Figura 79. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 15.....	163
Figura 80. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 15, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.....	164
Figura 81. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 5% con presa cerrada. La línea azul: perfil medido y la línea fucsia: perfil calculado.....	166
Figura 82. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 5% con presa cerrada. La línea azul: perfil medido y la línea fucsia: perfil calculado.....	166
Figura 83, perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 7.5% con presa cerrada. La línea azul: perfil medido y la línea fucsia: perfil calculado.....	168
Figura 84. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 7.5% con presa cerrada. La línea azul: perfil experimental y la línea fucsia: perfil calculado.....	168
Figura 85. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 10% con presa cerrada. La línea azul: perfil medido y la línea fucsia: perfil calculado.....	170
Figura 86. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 10% con presa cerrada. La línea azul: perfil medido y la línea fucsia: perfil calculado.....	170
Figura 87. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 7.5% con presa cerrada. La línea azul: perfil experimental y la línea fucsia: perfil calculado.....	171
Figura 88. Foto del ensayo 1 donde se ve claramente que el perfil M1 comienza a formarse aproximadamente a 6 metros del la presa.....	177
Figura 89. Esquema de la condición de equilibrio en el canal con suministro de sedimentos.....	179
Figura 90. Esquema de la condición de equilibrio en el canal. Aguas claras.....	180

INDICE TABLAS

Tabla 1.- Pendientes de equilibrio y volúmenes de sedimentación de las presas cerradas. Tomado de López y otros (2007).....	20
Tabla 2. Tipos de perfiles del flujo en canales prismáticos. Tomado de Chow (2000).....	45
Tabla 3. Variables y sus significados de los datos de entrada por el archivo de texto. Tomado de López (1998).	73
Tabla 4. Granulometría del material utilizado para la adecuación del fondo del canal.....	83
Tabla 5. Cálculo de la capacidad de transporte mediante la fórmula de Engelund-hansen para las diferentes pendientes y propuesta de un caudal sólido menor que dicha capacidad.....	84
Tabla 6. Granulometría de la arena utilizada en los experimentos	86
Tabla 7. Pendiente de compensación obtenida para la pendiente de 7,5% para las diversas concentraciones de sedimento vertido en el canal de ensayo	173
Tabla 8. Pendiente de compensación obtenida para la pendiente de 10% para las diversas concentraciones de sedimento vertido en el canal de ensayo	173
Tabla 9. Pendientes de compensación o equilibrio obtenidos en los ensayos experimentales en conjunto con la obtenida por la fórmula japonesa	173
Tabla 10. Velocidad de propagación del delta obtenida para las pendientes 5%, 7,5%, 10% y para las diversas concentraciones de sedimento vertido en el canal de ensayo.....	175

INDICE DE ANEXOS

Anexo Ensayo 1	186
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 2	226
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 3	229
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 4	245
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 5	252
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 6	261
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 7	264
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 8	269
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 9	274
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 10	279
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 11	295
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 12	297
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	
Anexo Ensayo 13	300
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimenta	
Anexo Ensayo 14	303
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	

Anexo Ensayo 15.	308
Tablas De Datos Medidos Sobre El Canal Experimental	

1. INTRODUCCION

1.1. Motivación

Los ríos de montaña presentan gran diferencia con respecto a los ríos aluviales en sus condiciones topográficas, morfológicas y geológicas, que se manifiestan en que la hidráulica y el transporte de sedimentos en este tipo de corrientes sean igualmente muy diferentes. La principal característica topográfica de los ríos de montaña es que poseen pendientes superiores a 0,1%, hidráulicamente números de Froude cercanos a 1 (condición para régimen de flujo crítico), en cuanto a la morfología, no presentan meandros o curvaturas marcadas, En lo geológico los materiales de fondo corresponden en su mayoría a cantos y gravas, lo cual influye significativamente en la resistencia al flujo y a la capacidad de transporte de los mismos. Las características nombradas anteriormente hacen que los modelos hidráulicos y de transporte de sedimentos no sean tan fácilmente aplicables a estos ríos ya que se acarrean enormes errores de tipo hidráulico del flujo y de transporte de sedimentos; En este sentido para desarrollar la hidráulica de ríos de montaña es necesario determinar la resistencia al flujo o rugosidad de fondo, la geometría del canal, granulometría del sedimento arrastrado por el río, material del lecho, caudal sólido, capacidad de transporte, entre otras.

En otro sentido cabe destacar que la importancia del análisis de la hidráulica y el transporte de sedimentos en ríos de montaña, radica en desarrollar modelos matemáticos simulados para el análisis de unas determinadas condiciones de un río en específico y de esta manera poder estimar las variables de diseño de obras hidráulicas de control, tal es el caso de las presas de retención de sedimentos en el Estado Vargas.

El estudio de las presas de retención de sedimentos se hace importante ya que de este depende su establecimiento como medida de seguridad para mitigar los efectos devastadores que puede generar un deslave o flujo torrencial con sedimentos para la población y la economía de una región o Estado. Este trabajo se orienta al análisis experimental del funcionamiento de presas cerradas con y sin vertedero, para la retención de sedimentos en ríos de montaña. Se propone mediante simulaciones en laboratorio, estudiar el comportamiento de estas presas de retención de sedimentos que se están construyendo hoy día en el Estado Vargas, con el fin de establecer las pendientes de compensación aguas arriba de las presas, variación temporal y espacial del lecho y otros aspectos resaltantes del proceso de sedimentación y degradación, así como también el análisis de las granulometrías del lecho asociadas con estas simulaciones.

1.2. El Problema

Según lo refiere López y otros (2007), a partir de los extraordinarios flujos torrenciales que ocurrieron en Venezuela en Diciembre de 1999 que causaron uno de los peores desastres de origen natural en América Latina, arrasando con poblaciones enteras que se habían asentado a lo largo del litoral costero en el Estado Vargas, donde aproximadamente 15.000 personas perdieron la vida y las pérdidas materiales superaron los 4 mil millones de dólares, el gobierno nacional inició un programa intensivo de construcción de obras hidráulicas para mitigar y atenuar los efectos de flujos torrenciales. Al presente se han construido 35 presas para estabilización de cauces y retención de sedimentos, distribuidas entre 18 quebradas o cauces torrenciales. Algunas de estas presas son abiertas, del tipo ranurada o con ventanas, y otras son cerradas. La mayoría ha sido construida con gaviones, pero se encuentran también presas de concreto armado, concreto ciclópeo, y presas con elementos tubulares de acero. La existencia de diferentes tipos de estructuras y diferentes materiales en cuencas vecinas con características geomorfológicas similares, ofrece una oportunidad única para evaluar y comparar su comportamiento y desempeño hidráulico.

El funcionamiento general de las presas que se están construyendo en el Edo. Vargas está enmarcado dentro de las siguientes pautas generales evaluadas por López y otros para la quebrada Piedra Azul. La figura 1 presenta el perfil del lecho de la quebrada Piedra Azul antes y después de la construcción de las presas. Las tres presas han sido construidas en gavión, siendo las dos primeras cerradas, de alturas igual a 5 m y 4 m, y la última abierta, de 5 m de altura. Las Presas # 1 y # 2 presentan un grado de sedimentación total, mientras que la presa abierta # 3, se ha sedimentado parcialmente.

Aguas abajo de la Presa # 2, se ha producido una fuerte erosión del lecho (figura 2), habiendo este descendido unos 3 m, aproximadamente, lo cual puede atribuirse a la combinación de los procesos de erosión local por efecto del chorro y degradación generalizada debido a la retención de los sedimentos aguas arriba.

Las pendientes de equilibrio varían entre 2,3% y 3,67%. En la tabla 1 se indica también el valor de la pendiente de equilibrio calculado por la relación igual a $\frac{2}{3}$ del valor de la pendiente original S_0 , lo cual es una aproximación basada en observaciones japonesas, de uso común en el diseño de obras de corrección de torrentes. Como se observa en dicha tabla, los valores medidos son inferiores a los valores calculados.

El problema existente es la rápida sedimentación que están sufriendo las presas del Estado Vargas motivado a la alta capacidad de producción de sedimentos de las cuencas, por lo que este trabajo se propone investigar los procesos de sedimentación que ocurren aguas arriba de las presas que se construyen en cauces torrenciales.

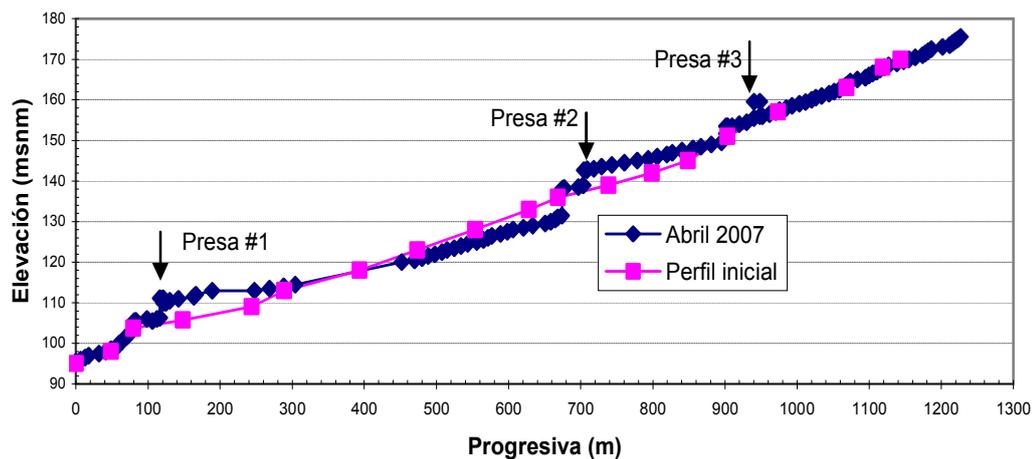


Figura 1. Perfiles del cauce de la quebrada Piedra Azul en los tramos aguas arriba de las presas. Tomado de López y otros (2007).



Figura 2.- Vista desde aguas abajo de la Presa # 2 en quebrada Piedra Azul. Foto izquierda tomada en Marzo 2005 y foto derecha en Abril 2007, observándose un descenso del lecho de unos 3m aproximadamente al pie del contradique. Tomado de López y otros (2007).

Quebrada	Presa N°	So	Se	2/3 So	L	ΔZ	Vol
		(%)	(%)	(%)	(m)	(m)	(m ³)
Piedra Azul	1	5,89	2,3	3,93	174	5	28.275
	2	6,3	3,67	4,20	186	4	28.644

Tabla 1.- Pendientes de equilibrio y volúmenes de sedimentación de las presas cerradas. Tomado de López y otros (2007).

1.3. Objetivos

Objetivo general:

Evaluar mediante ensayos experimentales en modelos físicos a escala reducida el funcionamiento de las presas cerradas para retención de sedimentos en ríos de montaña.

Objetivos específicos:

- Simular en laboratorio el comportamiento de las presas de retención de sedimento que se están construyendo actualmente en el Edo. Vargas.
- Determinar la pendiente de equilibrio morfológico aguas arriba de las presas cerradas para diferentes condiciones de pendiente del lecho, caudal líquido, caudal sólido y geometría del dique.
- Analizar la variación espacial y temporal del proceso de sedimentación que ocurre aguas arriba de la presa.

1.4. Antecedentes

Según Gonzáles y Córdova se describen los fenómenos de los aludes torrenciales causados en Vargas en 1999 de la siguiente forma:

Las crecidas que se producen en los torrentes o quebradas que drenan la cordillera de la costa, en la vertiente litoral del estado Vargas, desde la cuenca del río Maya hasta la cuenca del río Chuspa, traen consigo serios problemas de deposición de escombros en el fondo de las quebradas en sus tramos inferiores. Este fenómeno ha sido observado en la catástrofe de Diciembre de 1999, cuando los aludes torrenciales produjeron una reducción de las secciones del flujo de las quebradas con el consiguiente desborde lateral generando grandes conos de deyección. El origen de la ocurrencia de estos caudales con altas concentraciones de lodo, piedras y árboles, es producto de la presencia de altos volúmenes de precipitación que se traducen en un alto escurrimiento superficial sobre las laderas produciendo deslizamientos en masas y el movimiento, por efectos gravitacionales, de un flujo muy denso en los canales de las cuencas.

A juicio de López y García (2006), el desastre que se causó en el Estado Vargas en 1999, demostró la falta de preparación para afrontar un evento catastrófico de tal magnitud: Se había permitido la construcción anárquica de viviendas en las cercanías de los cauces, en los cañones o gargantas de los torrentes y en las laderas de los cerros inestables; tampoco se habían tomado las medidas más elementales de mitigación y de riesgo, tales como la construcción de obras hidráulicas para el control de sedimentos y la instalación de sistemas de alerta temprana, pese a los antecedentes previos que indicaban que el litoral central era una zona de alto riesgo, sujeta a inundaciones tales como las de 1798, 1912, 1938, 1944, 1948, 1951 y 1954.

Un paso importante, en la vía de tomar acciones pertinentes para reducir el riesgo es evaluar los eventos previos que se dieron en la zona. Para Sardi (2006), un cierto evento puede considerarse como catastrófico, no solamente por la magnitud del escurrimiento líquido, sino por las secuelas concomitantes como sería la abundancia de material de sedimentación que los cursos acarrear, los deslaves de las laderas, movimiento de grandes y pesadas masas etc. No basta, pues, para la comparación de tales eventos, apreciar la cantidad de agua escurrida o su intensidad, es necesario tener en cuenta otros factores. Así pues resulta útil tener una clasificación subjetiva, en forma de escala, definiendo las magnitudes por los efectos y el tiempo que llevaría volver la escena hasta la condición original, si fuera el caso.

En tal sentido Sardi propone la siguiente escala para comparar las inundaciones de los torrentes y ríos torrenciales:

Grado I

Pequeña inundación con profundidades del orden de los treinta centímetros; la zona inundada no es muy extensa y rápidamente se seca sin dejar apreciable deposición de sedimentos. No causa mayores daños.

Grado II

Inundación regular con profundidades mayores y en área más extensa que en el anterior caso, sin acarrear gran cantidad de sedimentos. Las pérdidas de vidas son accidentales, y sólo perecen los animales que no pudieron escapar. Las partes bajas de los edificios se inundan. Se requiere poco tiempo para que el terreno seque después de pasado el evento. Los daños son de relativa poca monta.

Grado III

Condición igual a la anterior pero las aguas acarrear gran cantidad de sedimentos lo que lleva a trabajos de limpieza y bote de sedimentos en ciertas partes del área inundada. Además hay pérdida de sembradíos y de toda vegetación por inmersión en aguas cargadas de lodo. Hay algunas víctimas humanas.

Grado IV

Fuerte inundación que puede acarrear algunas víctimas humanas por inmersión; las aguas adquieren en ciertas zonas gran velocidad y arrastran gran cantidad de sedimentos finos y algunos clastos tamaño cabeza de hombre. Los cursos se desvían, sobretodo en los vértices de los conos de deyección de los torrentes. Se produce gran acumulación de sedimentos que llevarán cierto tiempo en su remoción después de terminado el evento. Las partes bajas de las edificaciones se inundan totalmente y se atarquinan algunos puentes. Algunas viviendas son sepultadas. Se producen ciertos derrumbes en zonas críticas. El evento dura varios días.

Grado V

Fortísima inundación como consecuencia de gran precipitación pluvial, con antecedentes de suelos enaguachados. Los torrentes se salen de cauce y sus aguas adquieren gran velocidad arrastrando muchos sedimentos y transportando rocas de grandes dimensiones así como árboles y toda clase de vegetación. La deposición de

estos detritos así como de materiales térreos acarrea la transformación de la geografía del lugar y llevará mucho tiempo su remoción a fin de obtener el escenario original. Se atarquinan los puentes, y algunos se derrumban, también se sepultan viviendas de poca altura. La energía cinética de las rocas provoca el derrumbe de las obras contra las cuales chocan. Hay muchas víctimas humanas por ahogamiento, lapidación o efecto de la gran cineticidad de las corrientes. Los conos de deyección aumentan su extensión llegando a solaparse los de torrentes vecinos. La tormenta dura varios días.

Con base en la anterior clasificación aplicable a torrentes y ríos torrenciales, Sardi evalúa la magnitud de algunas crecientes ocurridas en el Litoral Central:

1780, Octubre

Según refiere José Barrera en comunicación del 14 de Febrero de 1798 para el Gobernador y Capitán General, para el mes de Octubre del año de 1780 ocurrió en la zona de La Guaira una pequeña inundación que llenó de agua el Parque, Maestranza y las bóvedas de ese puerto, un tiempo antes se había cerrado la plaza con una nueva muralla.

Se estima como de Grado II este evento.

1798, 11 al 13 de Febrero

Durante esos días llovió por 72 horas en La Guaira, desde Maiquetía hasta la zona de Macuto y se tiene noticia pormenorizada del suceso pues fue presenciado desde el balcón de la casa de alto, en donde temperaba, el Oidor de la Real Audiencia Don Nepomuceno de Pedroza. Las dos hojas de la Puerta de la Caleta se cerraron por el ímpetu de las aguas llegando el nivel de estas “hasta los pechos”.

El río Osorio se salió de su cauce “a lo último de la Calle del León, donde llaman Piedra de la Paciencia” precipitándose el río por tal Calle inundándolo todo y llegando hasta la Plaza Mayor, por suerte “el Capitán Don Joseph Escobar tuvo la feliz ocurrencia de llevar con sus criados una porción de estacas y clavó una doble estacada con la que logró cortar la fuerza del río”

Fue tanta la violencia del evento y tal “la avenida de piedras, árboles y tierra por el río que llenó todo el cauce” llevándose antes los cinco puentes que comunicaban ambos lados de la población, quedando solamente como unión el arco de la muralla, cuyo vano estaba cerrado por una reja y “fue fortuna que (la creciente) se llevó la reja de fierro y las estacas u órganos de madera que cerraban dicho arco o salida al mar”. También hubo que abrir en las bóvedas boquetes para facilitar el paso de las aguas.

Se estima que este evento puede catalogarse como de Grado IV.

Inundaciones en el Litoral Central en el siglo XIX.

Sardi manifiesta no tener noticias de las inundaciones que han debido ocurrir en el Litoral Central durante el siglo diecinueve, pero asegura que seguramente fueron menores del Grado III en los lugares muy poblados y quizás las hubo algo mayores que solo afectaron algunas haciendas con pocos vecinos. Plantea que en todo caso la actividad política y guerrera que asoló a la nación durante aquel siglo ha podido soslayar las noticias de tales eventos.

1912, Agosto

Un tremendo temporal se desencadenó entre las cuencas de los ríos Anare y Caruao. La hacienda Osma sufrió cuantiosas pérdidas, pues la creciente del río Grande desbastó todas las siembras de cacao. También crecieron los ríos Los Caracas, Uritapo, Todasana y Santa Clara. Grandes derrumbes se observaron cerca del pico La Montera en la alta montaña. Se estima del Grado III este evento.

1914, 14 de Enero

En la zona de Puerto La Cruz (al Este de La Guaira) ocurrió el día 14 de Enero de 1914 una fuerte tempestad con una precipitación pluvial de 1200 mm con duración de 5 a 6 horas, todos los cursos de agua de la cuenca crecieron y se desbordaron causando la ruina de los sembradíos y grandes deslizamientos en los cerros, muchas viviendas fueron destruidas y hubo que lamentar la muerte de unas veinte personas.

Este suceso puede estimarse entre que está entre los Grados III y IV. Según parece el núcleo de la tormenta se ubicó hacia el centro de la hoya, en donde estaba la oficina de la hacienda El Limón a 577 metros de altitud m.s.n.m.m. La precipitación anual media en esa estación fue de 1489 mm durante el período 1914-1939, “así pues la diluvial lluvia de ese día correspondió casi a la cantidad que cae en todo un año”.

1927, 30 de Octubre

Se registró una violenta turbonada que se precipitó en la cuenca del río Aguascalientes, entre Las Trincheras y El Palito en el Estado Carabobo, ocasionó grandes estragos en la zona, destruyendo varios puentes del antiguo Ferrocarril Valencia – Puerto Cabello hubo que lamentar pérdidas de vida y de habitaciones. Se estima el evento en Grado III.

1938, 25 de Noviembre

Fuerte precipitación en Maiquetía con crecida de los ríos aledaños. En la hacienda de café El Corozal recogieron solamente 47 mm de lluvia no pudiéndose obtener otros datos para cuantificar la cantidad de lluvia caída en total para toda la zona. Grado II.

1944, 9 de Mayo

En esa fecha ocurrió una fuerte tormenta, pero de poca duración relativa, pues llovió por dos horas en la zona de Chichiriviche, con una escorrentía total de 250 mm lo que equivale a una intensidad menor que la registrada en la hoya contigua de Puerto La Cruz el 14 de Enero de 1914. Se estima el evento en el Grado I.

1944, 15 de Noviembre

En el río Mamo se manifestó una fuerte crecida, produciendo importantes estragos, la carretera principal quedó destruida así como muchos ranchos y las sementeras de esa región. Se asigna el Grado III

1948, 4 de Agosto

Este día se registró un evento con tormenta de gran intensidad puesto que en tres horas y media hubo una precipitación de 455 mm, según medición practicada por el Dr. Eduardo Rohl y abarcó la zona comprendida entre Maiquetía y Camurí Chico y fue particularmente devastadora en Punta de Mulatos y en El Cojo con destrucción de puentes, viviendas, sementeras etc; “ocasionando igualmente la pérdida de muchas vidas entre los moradores de las bajas tierras”. Puede clasificarse entre los Grados III y IV de la escala propuesta.

1951, 15 al 17 de Febrero

Catastrófico evento que abarcó una gran extensión de Choroni a Caruao con muy intensas ráfagas de lluvia que duró 72 horas, produjo importantes cambios en la topografía con crecimiento de playas marítimas, muy notables frente a Macuto y en la zona de Punta de Mulatos en donde por cierto fue tapiado el puente así como los cementerios aledaños (el cementerio de La Guaira y el llamado de los Ingleses). El cauce del río Osorio en La Guaira se atarquinó totalmente, lo mismo ocurrió en el río de Punta de Mulatos, el de Macuto, invadiendo el Parque de Las Palomas, y el río El Cojo en las cercanías de Las Quince Letras, (Sucre Alemán 1951). Puede catalogarse esta catástrofe como de Grado IV.

1954, 14 de Diciembre

Fuerte crecida de los ríos de la Ciudad Vacacional de Los Caracas, los que se desbordaron inundando las obras que se habían construido en aquellos valles. El evento duró menos de un día y por las marcas de aquella creciente el MOP determinó un gasto líquido máximo instantáneo de 843 m³/s para el río Los Caracas, este caudal corresponde bastante bien con el determinado por el hidrograma sintético de Clark tomando como base la precipitación máxima caída en la estación de El Infiernito durante el mes de Febrero de 1951. Se estima esta inundación como del Grado III

1999, 15 y 16 Diciembre

El evento ocurrido en el Litoral Central en Diciembre de 1999 puede catalogarse de máxima magnitud y de la mayor importancia por sus efectos debidos: Primero a la gran cantidad de azolves removidos y con individuos de tamaño descomunal, cuya energía cinética es capaz de demoler cuanto se le atravesara en su camino, y segundo por ocurrir en zonas bastantes desarrolladas y habitadas. No hay duda de que en un evento catastrófico de esa magnitud concurren simultáneamente varias causas como son humedecimiento y hasta enaguachamiento previo de los suelos debido a continuas lluvias anteriores durante mucho tiempo, falta de insolación y por ende menor evaporación, seguida por una gran precipitación pluvial concentrada. La simultaneidad de estas circunstancias lleva seguramente a un largo período de retorno para eventos de igual aspecto.

Recientemente, durante el mes de febrero del año 2005 ocurrieron tormentas extremas en diferentes partes del país que trajeron como consecuencia el colapso de diferentes tipos de obras de arte de drenaje vial, entre las que destacan el colapso de varios puentes ubicados en el estado Táchira, como refiere González y Córdoba.

En la “comparación de las crecidas catastróficas en el Litoral Central de Venezuela”, Sardi, después de advertir sobre la similitud entre los eventos de 1798 y 1951, enfoca su interés en el balance entre el evento de 1951 y el de 1999:

Aun cuando el evento de 1951 tuvo la misma extensión y casi duración que el de 1999, este fue sin dudas de proporciones muchísimo mayores debido principalmente por la enorme cantidad de sedimentos arrastrados y el gran tamaño de las rocas que movilizó, con pérdidas cuantiosas de vidas y viviendas así como alteraciones notables de orden topográfico, con la secuela de necesitarse de mucho tiempo y notables desembolsos para normalizar la situación en el Estado Vargas. Estas diferencias pueden atribuirse a la concurrencia de diversos factores, entre otros el gran humedecimiento del suelo por cuantiosas y permanentes lluvias anteriores, aunado a una gran precipitación puntual, pudiendo pensarse en que el período de retorno para la concurrencia de tales circunstancias aleatorias podría ser de más de quinientos años.

2. MARCO TEORICO

2.1. Torrentes

Según Suárez (1993). Los torrentes son cursos de agua de zonas montañosas que se caracterizan por tener fuertes pendientes longitudinales mayores al 5%, las cuales son irregulares. Los cauces de los torrentes están formados por materiales gruesos, peñones, cantos rodados, grava y arena, entremezclados. En ellos predomina el arrastre de fondo sobre el transporte en suspensión.

Cuenca torrencial.

Las cuencas de los torrentes son poco extensas y de pendientes pronunciadas, lo que produce una respuesta rápida a las precipitaciones localizadas sobre ellas. Las crecidas son violentas y de corta duración (horas).

Ríos torrenciales.

Existe una categoría intermedia entre ríos y torrentes conocida como ríos torrenciales para indicar que se trata de un caso intermedio o de una transición entre ambos. Los ríos torrenciales suelen presentarse en las zonas de piedemonte, donde los torrentes depositan sus sedimentos, se suaviza la pendiente y comienzan a aparecer las características fluviales.

Los ríos torrenciales presentan cauces múltiples (trenzados) que se entrecruzan y cambian de posición constantemente. El material de lecho es grueso, formado por grava, cantos rodados y arena. La sección es muy irregular y cambiante.

En general un curso de agua comienza siendo un torrente en la zona montañosa, pasa a la categoría de río torrencial en el piedemonte y se transforma en río en la planicie aguas abajo. De un modo global se puede decir poco extensas y muy pendientes, lo que produce una respuesta rápida a las precipitaciones localizadas sobre ellas. Las crecidas son violentas y de corta duración (horas).

2.2. Partes de un torrente

Igualmente para Suárez, las partes constitutivas de un torrente (figura 3) son: *La cuenca contribuyente, la garganta y el cono de deyección.*

La cuenca contribuyente: Es la parte más alta y más extensa del torrente, tiene una forma semejante a la de un embudo y en ella se capta la mayor parte del flujo proveniente de las precipitaciones y el deshielo. La mayor parte de los sedimentos transportados por el torrente proviene de la cuenca, ya que en ella predomina la erosión, la profundización, ensanchamiento y ramificación de los cauces.



Figura 3. Partes de un torrente. Tomado de Suárez (1993).

La garganta: Generalmente está constituida por un cauce encajonado y profundo, situado aguas abajo de la cuenca receptora. La pendiente suele ser muy elevada y variable, aunque menor que la de los cauces ramificados de la cuenca. Las velocidades del flujo en creciente son muy altas. Este tramo identifica lo que comúnmente se denomina el torrente. La garganta tiene longitud muy variable, desde cero hasta varios kilómetros. El punto que identifica el comienzo de la garganta, se caracteriza por corresponder al estrechamiento de la cuenca y porque aguas abajo de este punto no existen afluentes importantes. El punto donde termina la garganta, corresponde al comienzo del cono de deyección. En la garganta predomina el

transporte de los materiales, el cual a su vez puede originar procesos de erosión en el lecho y en las márgenes.

El cono de deyección: En la desembocadura del torrente en la planicie o en un valle transversal, la pendiente se reduce bruscamente, la corriente disminuye de velocidad y se produce la sedimentación de los materiales transportados, los cuales se acumulan formando una especie de cono, de ahí la denominación de cono de deyección para este componente del torrente.

En cada creciente los bloques de mayor tamaño se depositan en primer lugar hacia la parte superior del cono, a continuación (hacia aguas abajo) los cantos rodados, seguidamente la grava y finalmente la arena. Pero como las crecientes son de diferentes magnitudes, una creciente de gran caudal puede empujar todos los materiales hacia aguas abajo, mientras que otra menor tenderá a depositar sus arrastres sólidos más aguas arriba. Como resultado es común encontrar en los conos de deyección una mezcla de materiales de diferentes tamaños, sin una estratificación definida.

Si el río en el que desemboca el torrente pasa lo suficientemente cerca del final de la garganta, puede erosionar la base del cono de deyección y este adoptará la forma de un cono truncado. De lo contrario el cono será completo, e incluso si hay una cierta distancia entre su base y el río, existirá en el torrente un cuarto componente que se denomina canal de desagüe, el cual suele caracterizarse por presentar un flujo relativamente lento, prácticamente libre de sedimentos, ya que la mayor parte de los mismos se ha depositado en el cono de deyección. El cauce del canal de desagüe tiende a encajarse en la planicie, hasta su desembocadura en el río.

Cuando el río en el que desemboca el torrente tiene capacidad suficiente para transportar todo el caudal sólido que éste le aporta, entonces el cono de deyección deja de crecer longitudinalmente y solo experimenta un proceso de ensanchamiento gradual. Por el contrario, si el río no tiene la capacidad necesaria de transporte, entonces el cono de deyección invade su cauce, desviándolo y pudiendo llegar incluso a obstruirlo totalmente, formando presas naturales durante las grandes crecientes del torrente, las cuales son destruidas durante las crecientes del río, en un sucesivo avance y retroceso de ambos, en busca del equilibrio dinámico

2.3. Clasificación de los torrentes y métodos de estabilización

Los torrentes han sido clasificados según diferentes aspectos. Desde un punto de vista práctico, los torrentes pueden clasificarse en dos tipos fundamentales: *depositantes* y *socavantes*.

Esta clasificación es relativa, ya que muchos torrentes no son completamente de un tipo o del otro, pudiendo existir tramos socavantes y tramos depositantes en un mismo curso de agua. Estos torrentes pueden clasificarse como de tipo mixto. En otros casos la evolución natural que experimenta el curso de agua durante el proceso de su formación, puede hacer que el torrente se transforme de un tipo en otro.

2.3.1. Torrentes depositantes

Son aquellos en los que el aporte de materiales sólidos al torrente es de tal magnitud que la energía del flujo se utiliza íntegramente en el transporte de los mismos hacia aguas abajo; se dice que el flujo está saturado, y como consecuencia de un aporte de sedimentos superior al que puede ser transportado, el cauce tiende a elevarse por la acumulación de estos materiales, o tiende en todo caso a no profundizarse, ya que la erosión del fondo no es posible.

La existencia de esta situación en un torrente es indicativa de que la cuenca está sometida a un intenso proceso de degradación superficial. Cuando el transporte es muy elevado, estos torrentes pueden representar un peligro, ya que los materiales que se acumulan en el cauce pueden dar origen a la formación de lavas torrenciales al ocurrir una creciente. Adicionalmente, pueden causar problemas en el cono de deyección, afectando las vías de comunicación que lo cruzan, u obstruyendo los puentes. Otro peligro que pueden presentar estos torrentes, tal como se expuso anteriormente, es que los sedimentos podrían obstruir el cauce del río en el que desembocan, formando una presa natural que se rompe al ocurrir una creciente en el río, lo que puede generar una ola de agua y sedimentos con un gran poder destructivo.

Las acciones que se requieren para estabilizar estos torrentes son las siguientes:

a. - Lo más importante en este caso es disminuir el aporte de sedimentos al cauce, mediante la ejecución de trabajos de estabilización en la cuenca. Muchos de estos trabajos toman años para su culminación y son costosos; además escapa a propósito de este proyecto.

b. - Construcción de presas escalonadas a lo largo del torrente, las cuales se denominan en este caso de retención, ya que su función principal es, en una primera etapa de funcionamiento, almacenar los materiales arrastrados. En una segunda etapa, una vez colmatadas, cumplen la función de regular el flujo de los sedimentos, principalmente por el efecto que causa la disminución de la pendiente.

Estas presas deben ser construidas preferentemente aguas abajo de ampliaciones del valle torrencial, para contar así con una mayor capacidad de almacenamiento de sólidos.

c. - En algunos casos, cuando la situación lo amerite en razón de la importancia de la infraestructura existente aguas abajo, puede ser necesario excavar y remover con cierta periodicidad parte del volumen de los sedimentos acumulados tras las presas, para así disponer nuevamente de capacidad de almacenamiento de sólidos. Los materiales excavados pueden ser utilizados en la construcción como bases granulares de calzadas, agregados de concreto, etc.

Las presas abiertas, denominadas así porque están provistas de grandes aberturas, retienen principalmente los sedimentos de mayor tamaño transportados durante las crecientes y dejan pasar gradualmente los de tamaños medios y finos, efectuando una selección granulométrica altamente beneficiosa, ya que las partículas de mayor tamaño son las que tienen el mayor potencial destructivo para la infraestructura existente aguas abajo, y en consecuencia son las que más interesa retener. Estas presas están especialmente indicadas en el caso de los torrentes depositantes. Una solución aconsejable para la estabilización de estos torrentes consiste en construir una presa tipo abierta en el extremo aguas arriba del tramo a equipar, y continuar hacia aguas abajo con la construcción de presas convencionales escalonadas a lo largo del cauce.

2.3.2. Torrentes socavantes

En estos torrentes la energía del flujo es suficiente para transportar hacia aguas abajo todos los materiales sólidos provenientes de la cuenca, quedando aún una capacidad de transporte adicional que tiende a erosionar el fondo y las márgenes del cauce torrencial, ya que la corriente no llega a saturarse con los aportes sólidos de la cuenca. El resultado es que el torrente ejerce un proceso continuo de profundización del cauce, lo que a su vez origina la desestabilización de las laderas, al ser socavadas en sus bases de apoyo, con los consiguientes deslizamientos de terreno, aún en el caso en que las laderas estén bien forestadas.

Los torrentes socavantes pueden tener cuencas bien arborizadas, por lo que en estos casos los trabajos de conservación y recuperación de las mismas podrían no ser prioritarios. El problema se centra generalmente en el propio cauce del torrente, el cual requiere ser estabilizado, frenando su tendencia a la profundización y a la erosión regresiva, que avanza hacia la parte superior de la cuenca.

El procedimiento más utilizado para estabilizar estos torrentes consiste en reducir la fuerza erosiva de la corriente, disminuyendo la velocidad del flujo mediante la construcción de presas escalonadas a lo largo del cauce, las cuales inicialmente frenan casi totalmente el flujo torrencial, almacenando los sedimentos transportados. Posteriormente, una vez colmatadas, regulan el flujo del agua y los sedimentos mediante la reducción de la pendiente, el aumento del ancho del cauce y la disipación

de la energía del flujo en las caldas sucesivas al pié de cada presa. Las presas en este caso se denominan de consolidación, ya que su función principal es fijar el fondo del cauce, evitando que el proceso de profundización del mismo continúe degradándolo. La nueva pendiente modificada del cauce, una vez colmatadas las presas (figura 4), se denomina pendiente de compensación, ya que con la misma se alcanza un estado de equilibrio entre la erosión y la sedimentación en el cauce (una compensa a la otra).

Una alternativa a la construcción de presas escalonadas es la construcción de umbrales de fondo, los cuales son obras transversales que no emergen sensiblemente del fondo del cauce, como se observa en la figura 5. Para que se logre el equilibrio del cauce con la construcción de umbrales, es necesario que se produzca una cierta erosión del perfil longitudinal del fondo, tal como se indica en la figura 5b, lo cual podría representar un inconveniente en algunos casos, a diferencia con la estabilización basada en la construcción de presas (figura 5a), en la que la pendiente de compensación se alcanza con una sobre elevación del aluvión (sedimentación).

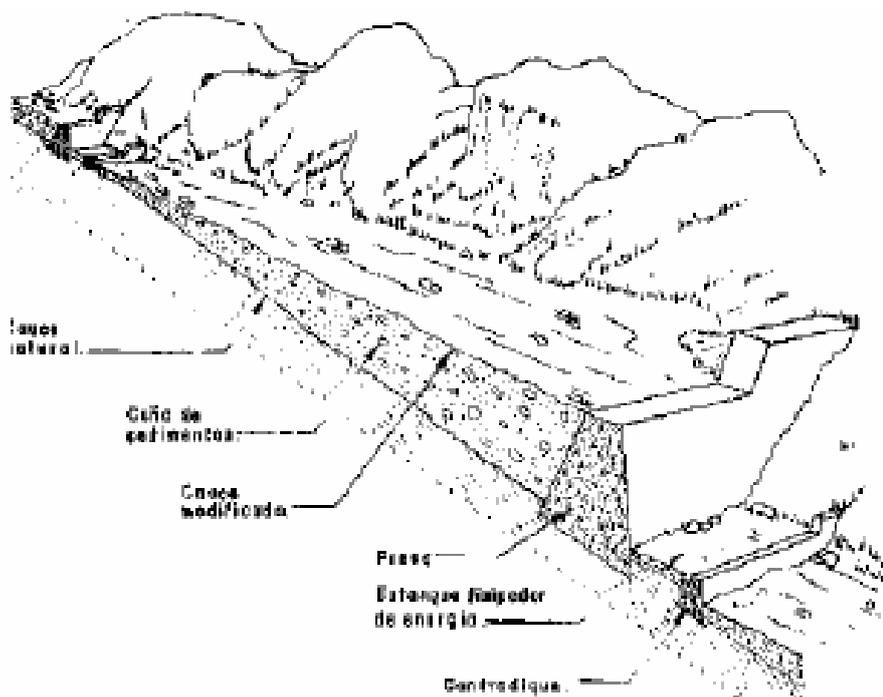


Figura 4. Estabilización de un torrente con presas escalonadas. Tomado de Suárez (1993).

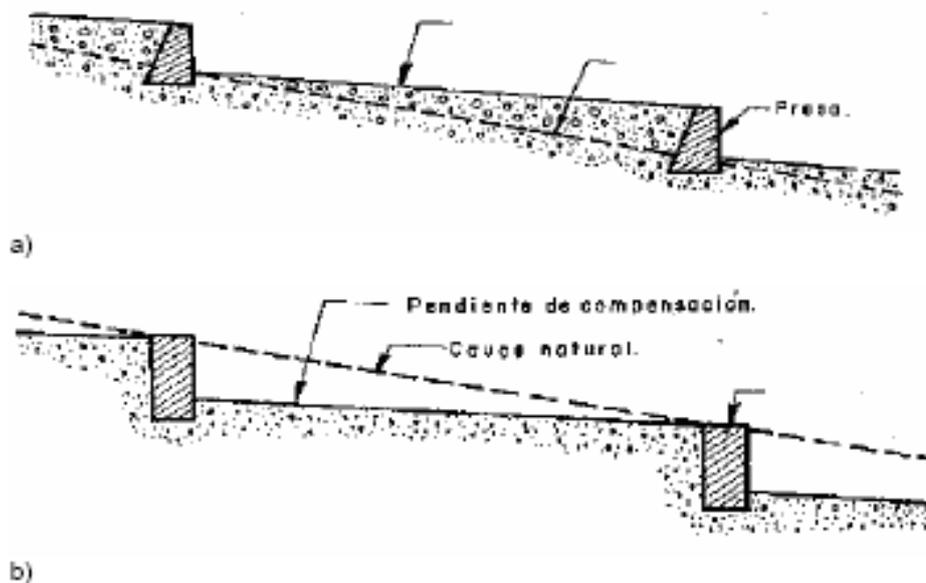


Figura 5. Comparación entre presas y umbrales de fondo. Tomado de Suárez (1993).

La profundización de los cauces en los torrentes socavantes, también puede ser controlada haciéndolos no erosionables, mediante su revestimientos con el enrocado o concreto. Esta solución puede utilizarse cuando por alguna razón no sea posible permitir la elevación del fondo del cauce. La desventaja fundamental de las obras de revestimiento, es que están sujetas a la degradación y al desgaste que producen los sedimentos arrastrados por el flujo. En este sentido, es una práctica común en Japón construir las obras de canalización en el tramo inferior del torrente (cono de deyección), donde generalmente se encuentran las ciudades y zonas agrícolas, una vez concluidas las presas (garganta) y los trabajos de estabilización de laderas (cuenca), cuando el volumen de los sedimentos transportados por el flujo haya disminuido considerablemente, ya que de lo contrario los costos de mantenimiento de la canalización serían muy elevados, a causa de la degradación.

2.4. Análisis cuantitativo de la respuesta del cauce fluvial. Ecuación de Lane

Según Martín Vide (2002), además de la planta y el perfil de un río, hemos de fijarnos en su perfil de fondo (o perfil longitudinal). Para estudiar el perfil es preciso adoptar una escala lo bastante grande (una distancia grande) para que tenga sentido hablar de la pendiente de un río. Sólo así las variaciones de cota del fondo de escala pequeña o mediana dejan de ser relevantes. Entonces decimos que el fondo de un río se encuentra en equilibrio en presencia de transporte de sedimentos cuando no sufre modificación en su perfil.

Este equilibrio, así definido como un efecto, proviene lógicamente de un equilibrio entre las acciones. Podría pensarse en un conjunto de variables que estarían interviniendo en el equilibrio, conjunto que ciertamente sería muy numeroso. Con un propósito sólo cualitativo, Lane (1955) propuso tener en cuenta 4 variables: el caudal líquido (q , caudal unitario), el caudal sólido (q_s , caudal sólido unitario que se mueve por el fondo), la pendiente (i) y el tamaño del sedimento (D), y las dispuso en la analogía de la balanza (figura 6). El desplazamiento del dial de la balanza por peso en exceso (los caudales) o por un brazo en exceso (la pendiente y el tamaño) indican sobre el limbo una erosión (descenso del fondo) o una acreción (ascenso del fondo), según sea en uno u otro sentido. La analogía de la balanza es una herramienta muy útil para analizar el desequilibrio de un río, en particular por causa de una intervención humana.

También podemos considerar la pendiente del río como la variable que consigue restablecer un equilibrio perdido. Esto tiene sentido físico más allá de la analogía de la balanza, pues un desequilibrio puede causar erosión y ésta desarrollarse en el sentido de disminuir la pendiente si se mantiene un punto fijo en el fondo de aguas abajo. A la inversa, un desequilibrio de acreción puede desarrollarse en el sentido de aumentar la pendiente con la misma condición aguas abajo. Vemos que esto da una explicación a los basculamientos o cambios de pendiente del fondo de un río (figura 7). La analogía de la balanza ofrece una explicación al reajuste que experimenta un río. Para alcanzar un nuevo equilibrio. Un ejemplo destacado de erosión y basculamiento es el efecto de la construcción de una presa.

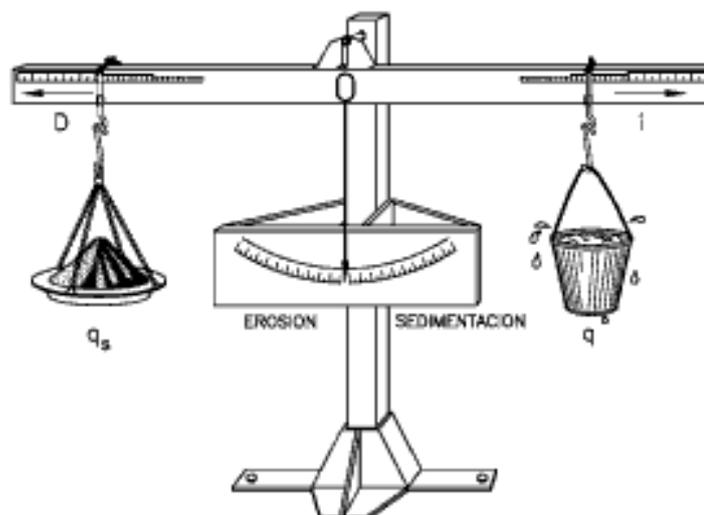


Figura 6. Analogía de la balanza de Lane. Tomado de Vide (2002).



Figura 7. Basculamiento del fondo con erosión (1) y con sedimentación (2). Tomado de Vide (2002).

Los caudales líquido y sólido de un río pueden estar equilibrados o no equilibrados. En el segundo caso, una corriente puede llevar un exceso de sólidos (“sobrealimentación”) o un defecto (“subalimentación”) lo que producirá acreción o erosión respectivamente. Asimismo de la analogía podemos extraer el concepto de pendiente de equilibrio que se define como aquella que equilibra unos caudales sólidos y líquidos determinados. Por ejemplo, muchos sólidos y poca agua se equilibran formando una gran pendiente y viceversa. El equilibrio depende también del tamaño del material. Los mismos caudales líquido y sólido pero con partículas más gruesas, se equilibran con una pendiente mayor y viceversa.

El aumento del brazo derecho de la balanza $q \cdot i$ representa ecuación la potencia de la corriente (W) por unidad de peso, de longitud y de anchura. Las variables D y q_s , que tenían un papel “intercambiable” en la geometría hidráulica, aparecen en el brazo izquierdo. El cociente i/D entre los brazos de la balanza es indicador de su sensibilidad. Los cambios de caudal, considerados como causa del desequilibrio, producen efectos muy intensos si i/D es grande (río muy sensible, es decir inestable), y al contrario, efectos de poca intensidad si i/D es pequeño (río insensible o estable), como se ve intuitivamente en la figura 7. Análogamente, el restablecimiento del equilibrio implica gran cambio de pendiente en el primer caso y pequeño en el segundo.

2.5. Aspectos generales del flujo con superficie libre

Según Martín Vide (2002), el conocimiento de la hidráulica de canales, es importante para abordar cualquier tipo de flujo con superficie libre, por lo que a continuación se reseñan los aspectos más importantes.

2.5.1. Tipos de flujo

Según Chow (2000), el flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y distribuirse de diferentes maneras. La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio.

Flujo permanente y no permanente: Con el tiempo como criterio. Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad del flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración.

El flujo es no permanente sí la profundidad no cambia con el tiempo. En la mayor parte de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes. Sin embargo el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, el flujo debe tratarse como no permanente, el nivel de flujo cambia de manera instantánea a medida que las ondas pasan y el elemento tiempo se vuelve de vital importancia para el diseño de estructuras de control. Para cualquier flujo, el caudal Q en una sección del canal se expresa por $Q=VA$. Donde V es la velocidad media y A es el área de la sección transversal de flujo perpendicular a la dirección de este, debido a que la velocidad media está definida como el caudal dividido por el área de la sección transversal.

Flujo uniforme y flujo variado: Con el espacio como criterio. Se dice que el flujo en canales abiertos es uniforme si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal. Un flujo UNIFORME puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo. El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración. El establecimiento de un flujo uniforme no permanente requeriría que la superficie del agua fluctuara de un tiempo a otro pero permaneciendo paralela al fondo del canal.

El flujo es variado si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal. El flujo variado puede ser permanente o no permanente es poco frecuente, el término "flujo no permanente" se utilizará de aquí en adelante para designar exclusivamente el flujo variado no permanente.

El flujo variado puede clasificarse además como rápidamente variado o gradualmente variado. El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias compartidamente cortas; de otro modo, es gradualmente variado. Un flujo rápidamente variado también se conoce como fenómeno local; algunos ejemplos son el resalto hidráulico y la caída hidráulica.

2.5.2. Flujo gradualmente variado

2.5.2.1. Hipótesis básicas

Igualmente según Chow (2000), el flujo gradualmente variado, es un flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo del canal. Esta definición establece dos condiciones: el flujo es permanente; es decir, las características hidráulicas de flujo permanecen constantes para el intervalo de tiempo

en consideración; y que las líneas de corrientes son paralelas, es decir, prevalece la distribución hidrostática de presiones sobre la sección de canal.

Tomando en cuenta la hipótesis básica: “La pérdida de altura en una sección es la misma que la de un flujo uniforme teniendo la velocidad y radio hidráulico de la sección”.

De acuerdo con esta suposición, la ecuación de flujo uniforme puede utilizarse para evaluar la pendiente de energía de un flujo gradualmente variado en una dada sección de canal, y el correspondiente coeficiente de rugosidad desarrollado en principio para flujo uniforme es aplicable al flujo variado. Esta hipótesis no ha sido confirmada precisamente por experimentos o por teoría, pero los errores debido a ello se cree que son pequeños comparados con los envueltos ordinariamente en el uso de una fórmula de flujo uniforme y en la selección del coeficiente de rugosidad; sin embargo a lo largo de los años de uso esta hipótesis es indudablemente más correcta para el flujo variado donde la velocidad aumenta que donde la velocidad disminuye, porque en un flujo de velocidad creciente la pérdida de altura es causada casi enteramente por efectos friccionales, mientras que en un flujo de velocidad decreciente habrá pérdidas por remolinos de gran escala.

Además de la anterior hipótesis, las siguientes hipótesis también serán utilizadas donde sea necesario una simplificación posterior en las discusiones subsecuentes:

- La pendiente del canal es pequeña ($< 10\%$). Así que:
 1. La profundidad del flujo es la misma si se usa una dirección vertical o normal (al fondo del canal).
 2. El factor de corrección de la presión $\cos \theta$ es igual a la unidad.
- El canal es prismático; es decir, el canal tiene alineamiento y forma constantes.
- La distribución de velocidad en la sección de canal está fijada. Así los coeficientes de distribución de velocidades son constantes.
- El transporte K y el factor de sección Z son funciones exponenciales de la profundidad de flujo.

El coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad de flujo y constante a través del tramo del canal bajo consideración.

2.5.2.2. Ecuación dinámica del flujo gradualmente variado

Consideremos el perfil del flujo gradualmente variado en la longitud dx de un canal abierto (figura 8). La altura total sobre el plano de referencia o datum en la sección aguas arriba es:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Donde: H es la altura total; z la distancia vertical del fondo del canal sobre el datum; d la profundidad de la sección de flujo; θ el ángulo de la pendiente del fondo del canal; α el coeficiente de energía; V la velocidad media del flujo a través de la sección.

Se supone que θ y α son constantes a través del tramo del canal bajo consideración. Tomando el fondo del canal como el eje x y diferenciando la ecuación (1) con respecto a la longitud x de la superficie del agua, el cual se mide a lo largo del eje x , se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \cos \theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2)$$

Debe destacarse que la pendiente está definida como el seno del ángulo de la pendiente y que se asume positiva si desciende en la dirección del flujo y negativa si asciende. De aquí en la figura 8, la pendiente de la energía $S_f = -dH/dx$, y la pendiente del fondo del canal $S_o = \text{Sen} \theta = -dz/dx$. Sustituyendo estas pendientes en la ecuación (2) y resolviendo para dd/dx ,

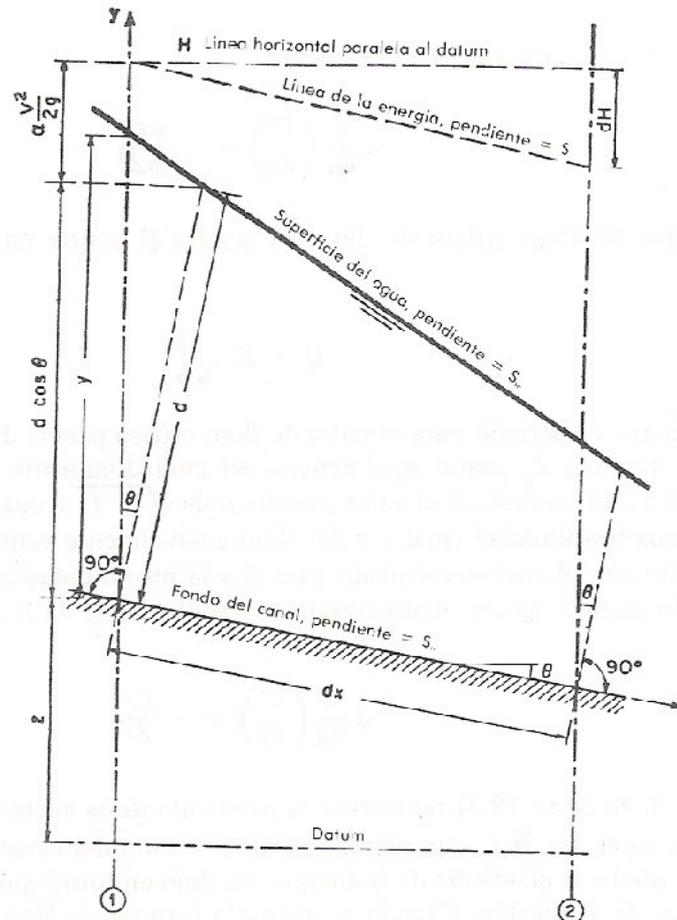


Figura 8. Derivación de la ecuación del flujo gradualmente variado. Tomado de Chow (2000).

$$\frac{dd}{dx} = \frac{S_o - S_f}{\cos \theta + \alpha \frac{d}{dd} \left(\frac{V^2}{2g} \right)} \quad (3)$$

Ésta ecuación diferencial general para flujo gradualmente variado, referido de aquí en adelante como la *ecuación dinámica de flujo gradualmente graduado* representa la pendiente de la superficie del agua con respecto al fondo del canal. La profundidad d se mide desde el fondo del canal, y el fondo del canal es tomado como el eje x . Así, la pendiente de la superficie del agua es igual a la pendiente del fondo S_o si $dd/dx=0$, menor que S_o si dd/dx es positiva, y más grande que S_o si dd/dx es negativa.

En la ecuación superior, el ángulo θ de la pendiente ha sido supuesto constante o independiente de x . De otro modo, un término $-d\text{sen}\theta (d\theta/dd)$, donde θ es una función de x , podría haber sido agregado al denominador. Para pequeño θ , $\cos\theta \approx 1$, $d \approx y$ y $dd/dx \approx dy/dx$. Así la ecuación (3) se hace:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{V^2}{2g} \right)} \quad (4)$$

En la mayoría de los casos para pendientes del canal pequeñas, concordantemente la ecuación (4) será utilizada.

El término $\alpha d(V^2/2g)/dy$ en la ecuación del flujo variado representa el cambio de la altura de velocidad. El coeficiente α ha sido supuesto que sea constante de sección a sección en el tramo del canal en consideración. De otro modo, el cambio en la altura de velocidad podría haber sido expresado como $d(\alpha V^2/2g)/dy$, donde α es una función de x . ya que $V=Q/A$. Q es constante y $dA/dy=T$, el término altura de velocidad se puede desarrollar así:

$$\alpha \frac{dy}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) = \frac{\alpha Q^2}{2g} * \frac{dA^{-2}}{dy} = -\frac{\alpha Q^2}{gA^3} = -\frac{\alpha Q^2 T}{gA^3} \quad (5)$$

Ya que $Z = \sqrt{\frac{A^3}{T}}$, la ecuación (5) se puede escribir:

$$\alpha \frac{dy}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) = -\frac{\alpha Q^2}{gZ^2} \quad (6)$$

Supuesto que el flujo crítico de descarga igual a Q ocurre en la sección, tenemos:

$$Q = Z_c \sqrt{\frac{g}{\alpha}} \quad (7)$$

Donde Z_c es el factor de sección para cálculos de flujo crítico para la descarga Q a la profundidad y_c . El símbolo Z usado aquí debería ser cuidadosamente distinguido del Z en la ecuación (5). El símbolo Z el valor numérico de $Z = \sqrt{A^3/T}$, el cual es calculado para la descarga Q a una profundidad igual a y del flujo gradualmente variado. El valor de Z_c es el factor de sección, el cual es calculado para Q a la

profundidad y_c como si el flujo fuera considerado crítico. Ahora sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (6) nos queda

$$\alpha \frac{dy}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) = - \frac{Z_c^2}{Z^2} \quad (8)$$

El término S_f en la ecuación (4) representa la pendiente de la energía. De acuerdo a la primera hipótesis, esta pendiente en la sección del canal del flujo gradualmente graduado es igual a la pendiente de la energía del flujo uniforme que tiene la velocidad y radio hidráulico de la sección. Cuando se utiliza la fórmula de Manning, la pendiente de energía es

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{2.22 R^{4/3}} \quad (9)$$

Cuando se usa la fórmula de Chézy,

$$S_f = \frac{V^2}{C^2 R} \quad (10)$$

En forma general y expresada en términos del transporte K , la pendiente de la energía de la ecuación (5) se puede escribir

$$S_f = \frac{Q^2}{K^2} \quad (11)$$

Supuesto que un flujo uniforme de una descarga igual a Q ocurre en la sección. La pendiente de la energía podría ser igual a la pendiente del fondo, y la ecuación (11) puede escribirse

$$S_o = \frac{Q^2}{K_n^2} \quad (12)$$

Donde K_n es el transporte para el flujo uniforme a la profundidad y_n . Este K_n debe distinguirse de la K en la ecuación (11). La notación K representa el valor numérico del transporte calculado para Q a la profundidad y_n como si el flujo fuese considerado uniforme. Dividiendo la ecuación (11) por la (12), tenemos

$$\frac{S_f}{S_o} = \frac{K_n^2}{K^2} \quad (13)$$

Y sustituyendo las ecuaciones (8) y (13) en la ecuación (4), tenemos

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2}{1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2} \quad (14)$$

2.5.2.3. Características de los perfiles de flujo

Según Chow (2000). La ecuación dinámica de flujo gradualmente variado, desarrollada anteriormente, expresa la pendiente longitudinal de la superficie del flujo con respecto al fondo del canal. Puede ser usada así, para describir las características de varios perfiles del flujo o perfiles de la superficie del agua del flujo. Por simplicidad, se considera el canal como prismático y la ecuación (14) utilizada para el análisis. Los valores de K y Z en esta ecuación se suponen que crecen y decrecen continuamente con la profundidad y . Esto es cierto para todas las secciones de canales abiertos con excepción de conductos, el valor de K , después de alcanzar su máximo valor, decrecerá a medida que la profundidad de flujo se aproxima a la parte superior del conducto.

El perfil de flujo representa *la curva de la superficie* del flujo. Este representará una curva de remanso, si la profundidad de flujo aumenta en la dirección del flujo, y una curva de caída, si la profundidad decrece en la dirección del flujo.

Para una curva de remanso, dy/dx es positivo y una curva de caída si dy/dx es negativa.

Para una curva de remanso, dy/dx es positiva; así la ecuación (14) da dos casos posibles:

$$1.1 - (K_n / K)^2 > 0 \text{ y } 1 - (Z_n / Z)^2 > 0$$

$$2.1 - (K_n / K)^2 < 0 \text{ y } 1 - (Z_n / Z)^2 < 0$$

Ya que los valores de K y Z aumentan y disminuyen continuamente con la profundidad y , el primer caso indica que $y > y_n$ y $y > y_c$. Como $y > y_c$ el flujo debe ser subcrítico. Si $y > y_n > y_c$, el flujo subcrítico debe ocurrir en un canal medio (es decir, un canal con pendiente subcrítica). Por otro lado, si $y > y_c > y_n$, el flujo subcrítico debe ocurrir en un canal de gran pendiente (es decir, un canal con pendiente supercrítica). De igual forma el segundo caso indica que $y < y_n$ y $y < y_c$. El flujo correspondiente debe ser supercrítico; y éste ocurre en un canal medio si $y_n > y_c > y$ y en un canal empinado si $y_c > y_n > y$.

Para una curva de caída, dy/dx es negativo y la ecuación 5 da dos casos posibles:

$$1.1 - (K_n / K)^2 > 0 \text{ y } 1 - (Z_n / Z)^2 < 0$$

$$2.1 - (K_n / K)^2 < 0 \text{ y } 1 - (Z_n / Z)^2 > 0$$

El primer caso indica que $y_c > y > y_n$ y, así, que el flujo es supercrítico en un canal de gran pendiente. De igual forma, el segundo caso indica que $y_n > y > y_c$, o que el flujo es subcrítico en un canal de pendiente moderada.

Cuando la superficie del agua es paralela al fondo del canal, $dy/dx = 0$, y la ecuación (14) da $1 - (K_n / K)^2 = 0$, ó $y = y_n$, lo cual indica un flujo uniforme. El flujo es uniforme crítico si $y = y_n = y_c$, uniforme subcrítico si $y = y_n > y_c$ y uniforme supercrítico si $y_c > y_n = y$.

Para propósitos de análisis, la pendiente del canal puede clasificarse como pendiente sostenida y pendiente no sostenida. Una pendiente sostenida es una pendiente del canal que cae en la dirección del flujo. Entonces, una pendiente sostenida es siempre positiva y puede llamarse pendiente positiva. Una pendiente sostenida o positiva puede ser crítica, moderada (subcrítica) o pronunciada (supercrítica). Una pendiente no sostenida puede ser horizontal o adversa. Una pendiente horizontal es una pendiente cero. Una pendiente adversa es una pendiente negativa que se levanta en la dirección del flujo.

En un canal de pendiente horizontal o $S_o = 0$, ecuación (12) da $K_n = \infty$ o $y_n = \infty$. Ya que $K_n = \sqrt{S_o} = Q$, la ecuación (14) para canales horizontales se puede escribir

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\left(\frac{Q}{K}\right)^2}{1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2} \quad (15)$$

Considerando $y_n = \infty$, la ecuación 15 indica dos condiciones posibles:

$$1. y_n > y > y_c$$

$$2. y_n > y_c > y$$

El primer caso representa un flujo subcrítico con una curva de caída, debido a que dy/dx se muestra como negativo. El segundo caso representa un flujo supercrítico con una curva de remanso, debido a que dy/dx se muestra como positivo.

En un canal de pendiente adversa, o $S_o < 0$, la ecuación (12) indica que, para valores negativos de S_o , K_n debe ser imaginario o K_n^2 debe ser negativo. Lo cual nos arroja a dos casos posibles:

1. Un flujo subcrítico en el canal en el cual $y > y_c$.
2. Un flujo supercrítico en el cual $y < y_c$.

En el primer caso dy/dx es negativo y el perfil de flujo es una curva de caída. En el segundo caso dy/dx es positivo y el perfil de flujo es una curva de remanso.

Los análisis obtenidos anteriormente se resumirán en la tabla 2 y figura 9 a continuación.

Pendiente del canal	Designación			Relación de y a y_n y y_c			Tipo general de curva	Tipo de flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3		
Horizontal $S_o = 0$	Ninguna			$y > y_n > y_c$			Ninguna	Ninguna
		H2		$y_n > y > y_c$			Desagüe	Subcrítica
			H3	$y_n > y_c > y$			Remanso	Supercrítica
Moderada $0 < S_o < S_c$	M1			$y > y_n > y_c$			Remanso	Subcrítica
		M2		$y_n > y > y_c$			Desagüe	Subcrítica
			M3	$y_n > y_c > y$			Remanso	Supercrítica
Crítica $S_o = S_c > 0$	C1			$y > y_c = y_n$			Remanso	Subcrítica
		C2		$y_c = y = y_n$			Paralela al fondo del canal	Crítica-uniforme
			C3	$y_c = y_n > y$			Remanso	Supercrítica
Pronunciada $S_o > S_c > 0$	S1			$y > y_c > y_n$			Remanso	Subcrítica
		S2		$y_n > y > y_c$			Desagüe	Supercrítica
			S3	$y_c > y_n > y$			Remanso	Supercrítica
Adversa $S_o < 0$	None			$y > (y_n)^* > y_c$			Ninguna	Ninguna
		A2		$(y_n)^* > y > y_c$			Desagüe	Subcrítica
			A3	$(y_n)^* > y_c > y$			Remanso	Supercrítica

* y_n en paréntesis se asume un valor positivo.

Tabla 2. Tipos de perfiles del flujo en canales prismáticos. Tomado de Chow (2000).

Sin embargo algunos casos especiales de los perfiles teóricos del flujo se dan a conocer

A. Discontinuidad en el perfil de flujo. Cuando $y = y_c$, la ecuación (14) indica que $dy/dx = \infty$, es decir, que el perfil de flujo será vertical al cruzar la línea de profundidad crítica. Si la profundidad de flujo es cambiada bruscamente de un nivel bajo a un nivel alto al cruzar la línea de profundidad crítica, ocurrirá un salto hidráulico, representando una discontinuidad en el perfil de flujo. Si la profundidad cambia de un nivel alto a un nivel bajo, entonces ocurrirá una caída hidráulica. Siempre cerca o en la línea de profundidad crítica, el perfil de flujo es curvado para producir una curvatura tan grande que la hipótesis del flujo paralelo para la definición de flujo gradualmente variado introduciría grandes errores. Por consiguiente, el flujo puede ser tan curvilíneo o rápidamente variado que la teoría y las ecuaciones desarrolladas en el desglose anterior se vuelven inaplicables. De tal manera la ecuación (14) no puede usarse para describir o calcular de manera segura el perfil de flujo cerca de la profundidad crítica.

B. Comportamiento del perfil del flujo a profundidades específicas. Para los análisis subsiguientes, es importante reconocer el comportamiento teórico del perfil de flujo para diversas profundidades específicas. Cuando $y = \infty$, la ecuación (14) muestra que $dy/dx = S_0$, es decir, que la superficie de flujo es horizontal. Cuando $y = y_n$, la ecuación (14) muestra que $dy/dx = 0$, es decir, que la superficie de flujo es paralela al fondo del canal; esto significa flujo uniforme. Cuando $y = y_c$, un resalto hidráulico o una caída hidráulica en el perfil de flujo, tal como se vio. Cuando $y = y_n = y_c$, el flujo es uniforme y crítico.

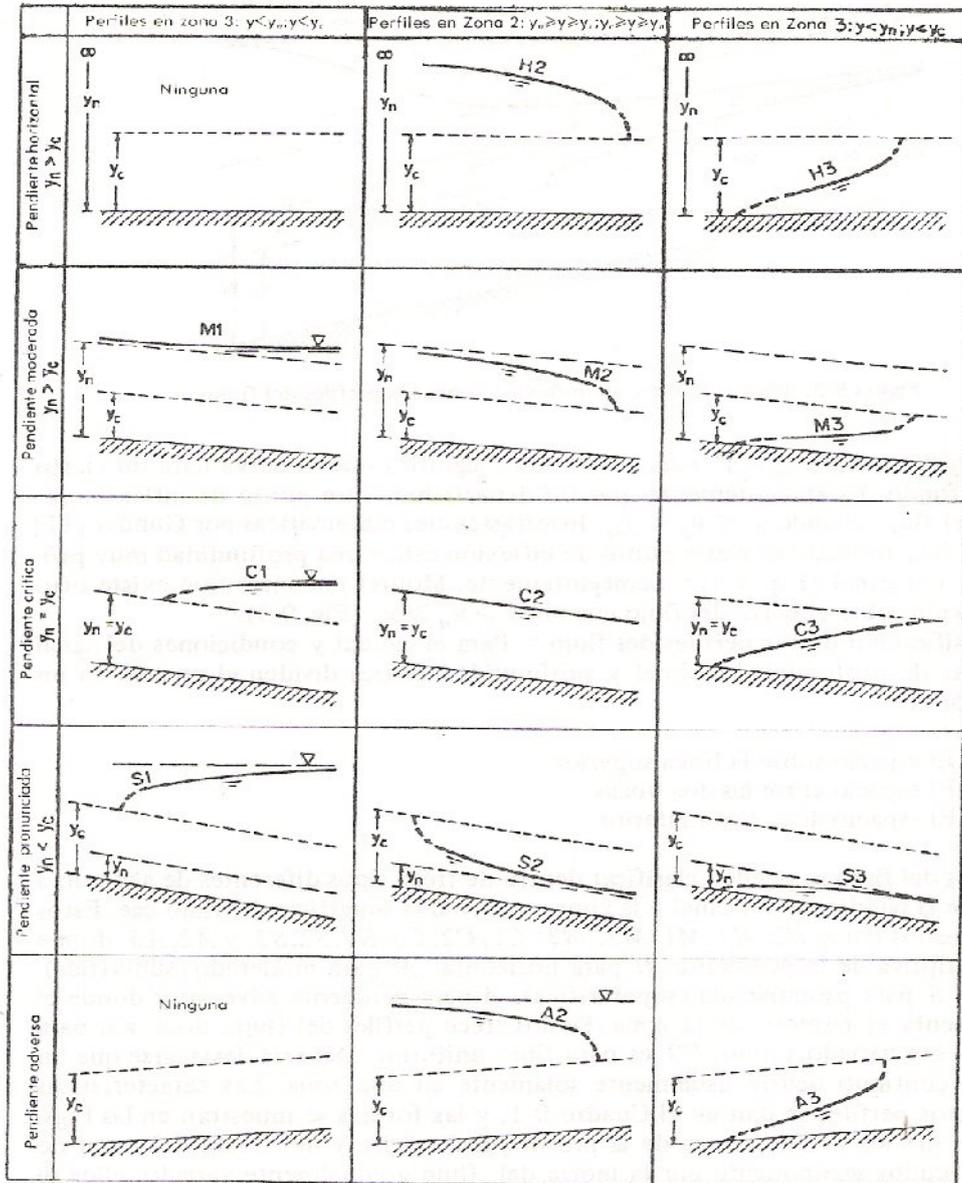


Figura 9. Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado. Tomado de Chow (2000).

2.5.2.4. Clasificación de los perfiles de flujo

Para un caudal y ciertas condiciones de un canal dadas las líneas de profundidad normal y las líneas de profundidad crítica dividen el espacio de un canal en tres zonas bien definidas:

- La zona 1: el espacio sobre la línea superior.
- La zona 2: el espacio entre las dos líneas.
- La zona 3: el espacio de la línea inferior.

De esta manera, los perfiles de flujo pueden clasificarse en trece tipos diferentes de acuerdo a la naturaleza de la pendiente del canal y la zona en la cual la superficie del flujo se encuentra. Estos tipos son denotados como H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3; A2, A3; donde la letra es descriptiva de la pendiente: H para horizontal, M para moderado (subcrítica), C para crítica, S para pronunciada (supercrítica) y A para pendiente adversa; y el número representa la zona. De los trece perfiles de flujo, doce son para flujo gradualmente variado y uno, C2, es para flujo uniforme.

Las características generales de estos perfiles se establecieron en la tabla 2, y sus formas se muestran en la figura 9. Tomando en cuenta que los perfiles cerca de la profundidad crítica y del fondo del canal no pueden definirse de manera segura por la teoría de flujo gradualmente variado, éstos se denotan con líneas a trazos punteados. Varios de los perfiles de flujo se tomarán en desarrollo a continuación.

A. Perfiles M. $S_o < S_c$ e $y_n > y_c$

El Perfil M1. Representa la curva de remanso más bien conocida; es el más importante de todos los perfiles de flujo desde un punto de vista práctico. Este perfil aparece cuando el extremo de aguas abajo de un canal moderado largo está sumergido en un embalse a una profundidad mayor que la profundidad normal del flujo en el canal. Este perfil cae en la zona 1. El extremo de aguas arriba de la curva es tangente a la línea de profundidad normal, ya que $dy/dx = 0$ cuando $y = y_n$; y en el extremo aguas abajo es tangente a la superficie horizontal del embalse, ya que $dy/dx = 0$ cuando $y = \infty$.

El Perfil M2. Ocurre cuando el fondo de un canal en el extremo aguas abajo está sumergido en un embalse a una profundidad menor que la profundidad normal. El extremo de aguas arriba del perfil de flujo es tangente a la línea de profundidad

normal, ya que $dy/dx = 0$ cuando $y = y_n$. Si la cantidad de sumergencia en el extremo de aguas abajo es menor que la profundidad crítica, el perfil terminará abruptamente, con su extremo tangente a una línea vertical a una profundidad igual a la profundidad crítica, ya que $dy/dx = \infty$ para $y = y_c$. Esto significa la formación de una caída hidráulica. Si la profundidad de sumergencia en el extremo aguas abajo es más grande que la profundidad crítica, entonces todo lo más que se forme del perfil quedará sobre la superficie del agua en el embalse.

El Perfil M3. Arranca teóricamente del fondo del canal aguas arriba, a pendiente de ángulo vertical o con ángulo agudo, dependiendo del tipo de fórmula usado de flujo uniforme, y termina con un salto hidráulico en el extremo aguas abajo. Este tipo de perfil ocurre usualmente cuando un flujo supercrítico entra en un canal moderado. El inicio del perfil, aunque no pueda ser definido precisamente por la teoría, depende de la velocidad inicial del agua saliente. Cuando a más alta velocidad, el perfil empezará más lejos aguas abajo. El extremo teórico del perfil aguas arriba intersectará el fondo del canal. En este extremo $y = 0$; entonces la velocidad podría hacerse infinita. Por consiguiente, el extremo teórico aguas arriba de un perfil M3 no puede nunca existir físicamente.

B. Perfiles S. $S_o > S_c$ e $y_n > y_c$

El Perfil S1. Empieza con un salto en el extremo aguas arriba y se hace tangente al nivel horizontal del embalse en el extremo aguas abajo.

El Perfil S2. Es una curva de caída. Por lo general es muy corto y más bien como una transición entre una caída hidráulica y el flujo uniforme, ya que se inicia aguas arriba con una pendiente vertical en la profundidad crítica y es tangente a la línea de profundidad normal en el extremo de aguas abajo.

El Perfil S3. Es también de un tipo transicional, formado entre un flujo supercrítico saliente y la línea de profundidad normal a la cual el perfil es tangente.

C. Perfiles C. $S_o = S_c$ e $y_n = y_c$

Cabe destacar que estos perfiles representan las condiciones de transición entre los perfiles M y S.

Asumiendo un canal ancho rectangular, se muestra que *los perfiles C1 y C3* son curvados y que el perfil C1 es asintótico a una línea horizontal. Cuando se usa la fórmula de Chézy, esta mostrará que los dos perfiles son líneas horizontales. El perfil C2 representa el caso de flujo crítico uniforme.

D. Perfiles H. $S_o = 0$ e $y_n = \infty$

Los Perfiles de tipo *H* son los casos limite de perfiles *M* cuando el fondo del canal se horizontal. Los perfiles *H2* y *H3* corresponden a los perfiles *M2* y *M3*, pero ningún perfil *H1* puede actualmente establecerse, ya que y_n es infinito.

E. Perfiles A. $S_o < 0$

De estos Perfiles *A* se puede concluir que:

El perfil *A1* es imposible, ya que el valor de y_n no es real. Los perfiles *A2* y *A3* son similares a los perfiles *H2* y *H3*, respectivamente. En general los perfiles tipo *A* ocurren infrecuentemente.

2.5.3. Resalto hidráulico

Según Chow (2000). El resalto hidráulico se produce por un cambio rápido en la profundidad del flujo desde un nivel bajo a un nivel alto, en otras palabras, cuando el flujo pasa de un régimen supercrítico a uno subcrítico. Ocurre con frecuencia en un canal por debajo de una compuerta deslizante de regulación, en la parte de aguas abajo de un vertedero o en el sitio donde un canal con alta pendiente se vuelve casi horizontal de manera súbita.

Entre las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico tenemos que se utiliza para: disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas y de esta manera prevenir la socavación aguas debajo de las estructuras; recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas abajo de una canal de medida y así mantener un nivel alto del agua en canales de irrigación u otros fines de distribución de aguas; Lograr un incremento en el peso sobre un lecho amortiguador y reducir la presión hacia arriba debajo de una estructura de mampostería mediante la subida de la profundidad de agua sobre el lecho amortiguador; incrementar la descarga de una esclusa manteniendo atrás el nivel aguas abajo, ya que la altura efectiva será reducida si se permite que el nivel aguas abajo ahogue el salto, para indicar condiciones especiales de flujo como la existencia de flujo supercrítico o la presencia de una sección de control, entre otras.

2.5.3.1. Resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales

Para flujo supercrítico en un canal rectangular horizontal, la energía del flujo está disipada a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, obteniéndose como resultado una disminución en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad de flujo y_1 y una profundidad y_2 aguas abajo satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} * \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (16)$$

Esta ecuación se puede representar por la curva en la figura 10. Esta curva ha sido verificada satisfactoriamente con muchos datos experimentales y son muy útiles en el análisis y diseño para resaltos hidráulicos.

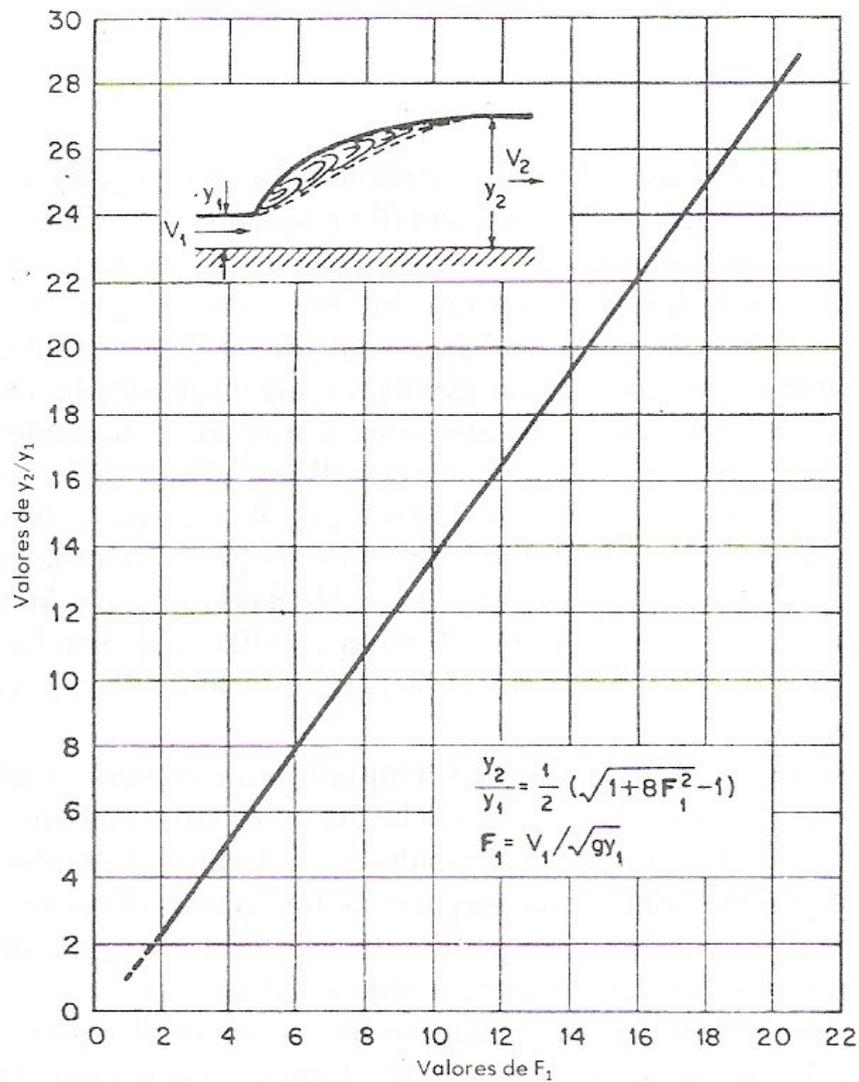


Figura 10. Relación entre F_1 y y_2/y_1 para el resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal. Tomado de Chow (2000).

2.5.3.2. Tipos de resaltos hidráulicos

Los resaltos hidráulicos pueden clasificarse según el número de Froude F_1 del flujo entrante, de acuerdo con los estudios del U.S Bureau of Reclamation, de la siguiente manera:

- Para $F_1 = 1$ el flujo es crítico y no se forma resalto.
- Para $F_1 = 1$ a 1.7, la superficie del agua muestra ondulaciones. Y el resalto es llamado *ondular*.
- Para $F_1 = 1.7$ a 2.5: en la superficie del agua se desarrollan una serie de pequeños remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece lisa. La velocidad a lo largo es ligeramente uniforme y la pérdida de energía es baja. Este resalto se llama *resalto débil*.
- Para $F_1 = 2.5$ a 4.5: hay un chorro oscilante entrando al resalto del fondo a la superficie y atrás otra vez sin periodicidad. Cada oscilación produce una gran onda de periodo irregular, la cual es muy común en canales, esta onda puede viajar a lo largo de varios kilómetros causando daños ilimitados a bancos en tierra y piedras sueltas, a este resalto se le llama *oscilante*.
- Para $F_1 = 4.5$ a 9.0: la extremidad aguas abajo del remolino superficial y el punto en el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurre a prácticamente la misma sección vertical. La acción y posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su rendimiento es el mejor. La disipación de energía varía entre 45% y 70%. Este resalto es llamado *permanente*.
- Para $F_1 = 9.0$ o mayor: el chorro de alta velocidad agarra golpes intermitentes de agua rodando hacia debajo de la cara del frente del resalto, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie áspera. La acción del salto es áspera pero efectiva ya que la disipación de energía puede alcanzar 85%. Este resalto se llama *resalto fuerte*.

En la figura 11 se muestran los diversos tipos de resaltos hidráulicos:

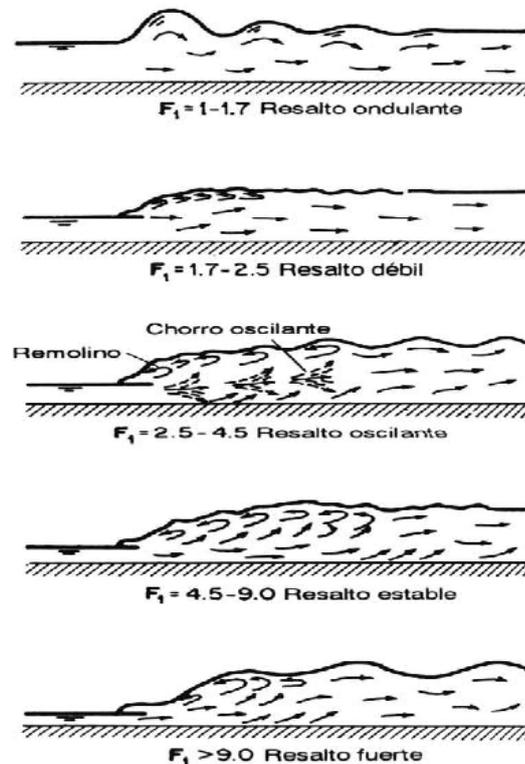


Figura 11. Tipos de resaltos hidráulicos. Tomado de Chow (2000).

2.5.3.3. Longitud del salto

Es definido como la distancia medida desde la cara del frente del resalto a un punto sobre la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. Esta longitud no puede ser determinada por medio de la teoría fácilmente, pero ha sido investigada experimentalmente por muchos investigadores del área de la hidráulica.

Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden ser graficados mediante el número de Froude F_1 contra la relación matemática adimensional $L/(y_2 - y_1)$, L/y_1 o L/y_2 . El dibujo obtenido de F_1 vs L/y_1 es probablemente el mejor, ya que la curva resultante puede ser definida mejor por los datos. Para propósitos prácticos, es deseable el dibujo de F_1 vs L/y_2 , porque la curva resultante muestra regularidad o una ligera porción plana para el rango de resaltos bien definidos. Una curva de F_1 vs L/y_2 mostrada en la figura 12 basada sobre los datos experimentales de seis canales de ensayos, ha sido preparada por la Bureau of Reclamation.

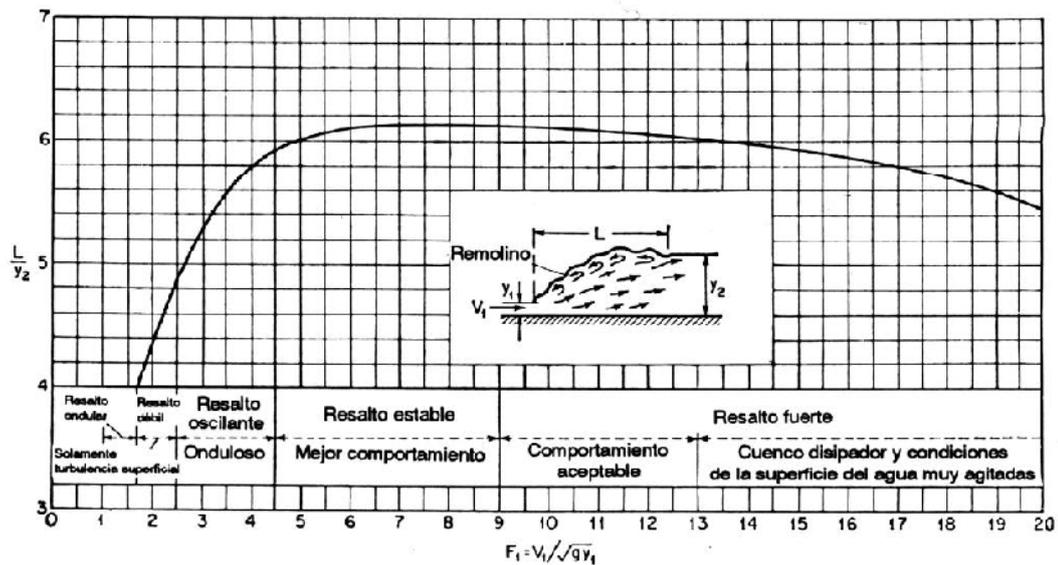


Figura 12. Gráfico de longitud en términos de profundidad secuente y_2 de resaltos en canales horizontales. Tomado de Chow (2000).

2.5.3.4. Localización del resalto hidráulico

Según Chow (2000), el resalto hidráulico ocurre en un flujo de tipo supercrítico cuando la profundidad cambia abruptamente a su profundidad secuente. Teóricamente, el resalto ocurrirá en un canal horizontal rectangular si las profundidades iniciales y secuentes y el número Froude de aproximación satisfacen la ecuación 16. Esta condición teórica se utiliza para ubicar la posición de un resalto. Para un estimado más ajustado de la posición del resalto, debe considerarse la longitud del resalto. En breve se ilustrarán la ubicación del resalto hidráulico en tres casos típicos. Figura 13.

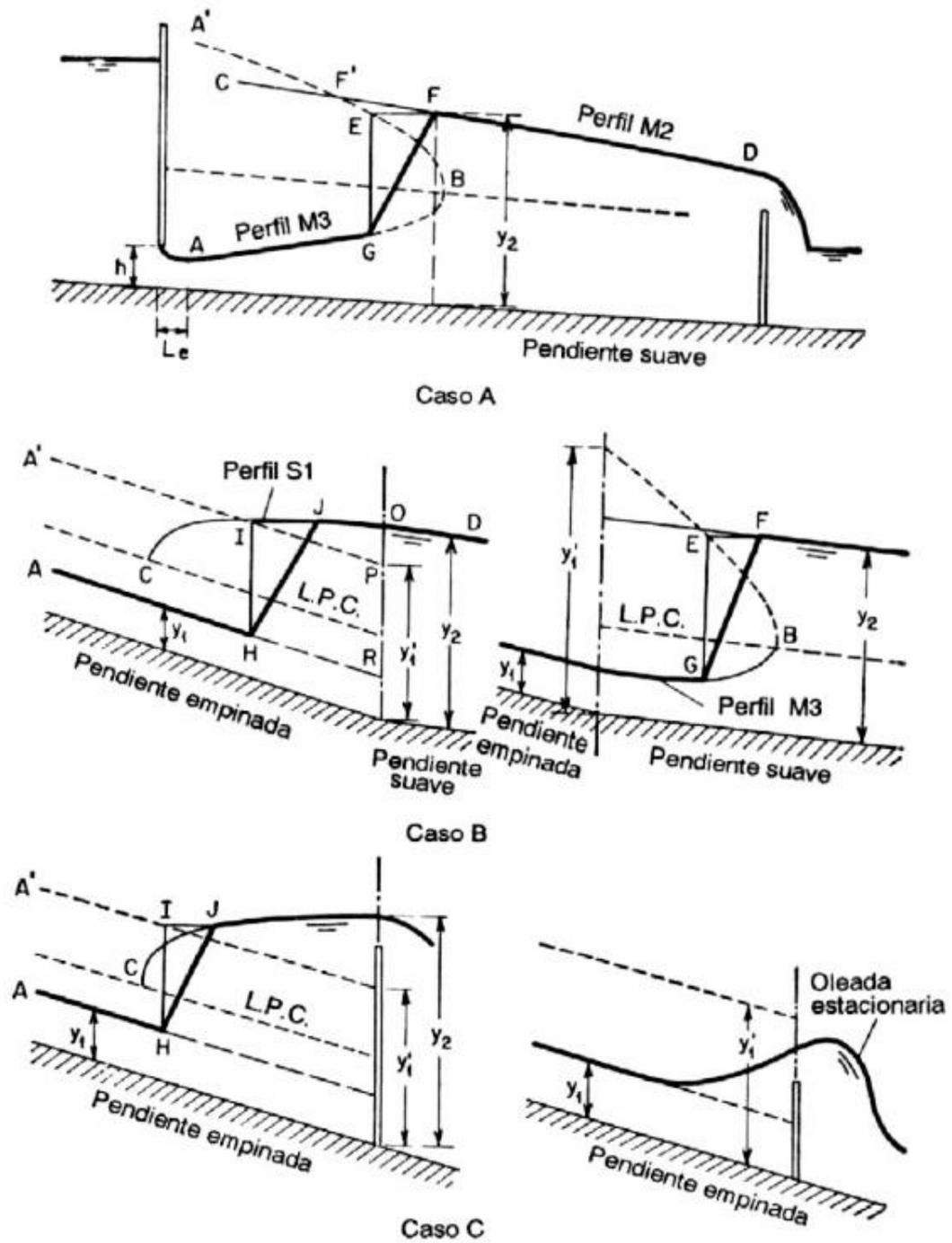


Figura 13. Localización del resalto hidráulico. Tomado de Chow (2000).

El caso A muestra el resalto por debajo de una compuerta en un canal de pendiente moderada. Los perfiles AB y CD pueden ser identificados como del tipo M2 y M3. La curva A'B es un dibujo de la profundidad seciente de AB. Se puede estimar la longitud del resalto por la posición de F'. Por medio de tanteos, una intersección horizontal entre las curvas A'B y CD se puede encontrar que es igual a la longitud del resalto. Por ejemplo, la distancia horizontal EF es igual a la longitud del resalto correspondiente a y_2 en F. Se hace aparente que el resalto se formará entre G y F, ya que la profundidad en F es seciente a la profundidad en G, y la distancia EF mide la longitud del resalto. Se puede notar que, si la longitud del resalto no fuera tomada en consideración en el análisis, el resalto podría haberse considerado que se formaría en el punto aguas arriba F', resultando en un error representado por F'F. En el caso A, se puede ver que, aumentando la profundidad aguas abajo o levantando la curva CD, el resalto puede ser movido aguas arriba. La profundidad aguas abajo se puede levantar a tal altura que el resalto será eventualmente inundado en el frente de la compuerta. Disminuyendo la profundidad aguas abajo o bajando CD, moverá el resalto aguas abajo.

Cuando hay un resalto hidráulico debajo de una compuerta, el flujo saliente de la compuerta formará un chorro que posee una vena contraída. La distancia L_c , desde la vena contraída a la abertura de la compuerta es usualmente corta. A despecho de esta distancia, hay una regla adoptada generalmente la cual establece que la vena contraída está localizada aproximadamente a una distancia h desde la abertura de la compuerta.

El caso B muestra el resalto en un canal teniendo un quiebre en la pendiente de fondo que cambia de empinada a moderada. Por simplicidad, se ha asumido que el flujo es uniforme en el canal excepto del tramo entre el resalto y el quiebre. El resalto puede ocurrir en ya sea el canal empinado o en el canal moderado, dependiendo de si la profundidad aguas abajo y_2 es más grande o menos grande que la profundidad y_1 seciente de la profundidad de aguas arriba y_1' . Si la profundidad y_2 es mayor que y_1' , el resalto ocurrirá en la región empinada. Por consiguiente la curva de la superficie OC es del tipo S1. La línea A'P indica la profundidad seciente a la línea AR. Ahora, determinar una intersección horizontal IJ entre A'P y CO, que es igual a la longitud del resalto. Es aparente que un resalto HJ empezará en la sección conteniendo I. Si la profundidad y_2 es bajada aproximadamente a menos que y_1' , el resalto empezará a moverse dentro del canal moderado. En este caso el resalto puede estar ubicado tal como se describe en el caso A.

El caso C muestra el resalto por detrás de una barrera desbordada. Teóricamente, se formará un resalto si la profundidad en la barrera es más grande que la profundidad y_1' seciente a la profundidad supercrítica y_1 . La ubicación del resalto es la misma a la del caso B si el resalto ocurre en la región empinada. Aumentando la altura de la

barrera se moverá el resalto aguas arriba. Disminuyendo la altura el resalto se moverá aguas abajo. Cuando la profundidad en la barrera es menor que la secante y_1 , la

barrera será cruzada por una elevación fija en la forma de una superficie ondular simple cuya levante no será seguida por ondulaciones posteriores.

2.5.4. Programa para el cálculo de perfiles de agua en canales abiertos

Según López (1998), para la estimación de los perfiles de agua que se originaron en el canal abierto, particularmente para los ensayos presentes en este trabajo se utilizó un programa de estimación matemática con el nombre “PERFIL”, que mostraremos a continuación. El programa juega un papel primordial en el diseño de las obras de protección y disipadores de energía, así como también en la evaluación y control de las manchas de inundación.

En esta sección también se presenta la metodología de cálculo para la determinación numérica de los perfiles líquidos en canales prismáticos mediante la implementación computacional de este programa.

“**PERFIL**”. Es un programa desarrollado en base FORTRAN para determinar perfiles de agua en canales de geometría típica regular. Las secciones transversales que considera el programa son: rectangular, trapecial, triangular, circular o en herradura.

El programa se fundamenta en un balance de energía bajo condiciones de régimen permanente y no uniforme gradualmente variado. El programa resuelve numéricamente las ecuaciones resultantes utilizando el algoritmo de Newton o el método de la Bisección, dependiendo de la selección del usuario. El primer método es más eficiente y veloz, pero pudiera tener problemas de convergencia numérica en las cercanías de los controles críticos; como alternativa, el usuario puede hacer uso del método de la Bisección, el cual es más lento pero carece de la limitación del anterior. Cabe destacar que para las estimaciones realizadas a todos los ensayos realizados para este trabajo se utilizó el método de Newton.

El programa puede ser utilizado para calcular perfiles de agua en régimen subcrítico o supercrítico, para lo cual el usuario debe ubicar y definir el control hidráulico en la sección aguas abajo o aguas arriba, respectivamente. Igualmente el programa permite la determinación de perfiles en canales prismáticos o no prismáticos. Para el caso de secciones compuestas con diferentes grados de rugosidad, el usuario puede especificar en forma tabulada la variabilidad del coeficiente de Manning con la profundidad.

El programa es útil para determinar los perfiles de la superficie del agua que se generan en canales de riego, cunetas, canales y colectores de drenaje, túneles, rápidos, alcantarillas, etc. (López, 1998).

2.5.4.1. Ecuación de la energía

La ecuación que generalmente se utiliza para determinar los perfiles de agua en conducciones abiertas, bajo condiciones de flujo permanente no uniforme gradualmente variado, es la ecuación unidimensional de la energía que establece un balance energético global entre dos secciones vecinas de un tramo de canal (figura 14)

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_i \frac{V_i^2}{2g} Z_j + Y_j + \alpha_j \frac{V_j^2}{2g} + h_{fij} + \sum H_{L_{ij}} \quad (18)$$

En donde: Z = cota de fondo de la sección considerada.

Y = profundidad del flujo.

α = coeficiente de distribución de velocidades (coeficientes de Coriolis).

V = velocidad media en la sección de flujo.

$h_{f_{ij}}$ = pérdida de energía por fricción en el tramo ij .

$H_{L_{ij}}$ = sumatoria de pérdidas locales de energía en el tramo ij .

i = sección de flujo ubicada aguas arriba.

j = sección de flujo ubicada aguas abajo.

La ecuación (18) indica que la energía total disponible en la sección i (representada por los tres términos a la izquierda en dicha ecuación) es igual a la energía total disponible en la sección j (representada por los tres primeros términos en el lado derecho de esta ecuación) más las pérdidas de carga que ocurren en el tramo ij , separadas en su dos componentes de resistencia superficial $h_{f_{ij}}$ y resistencia de forma $H_{L_{ij}}$. Un diagrama de definición de términos se presenta en la figura 14

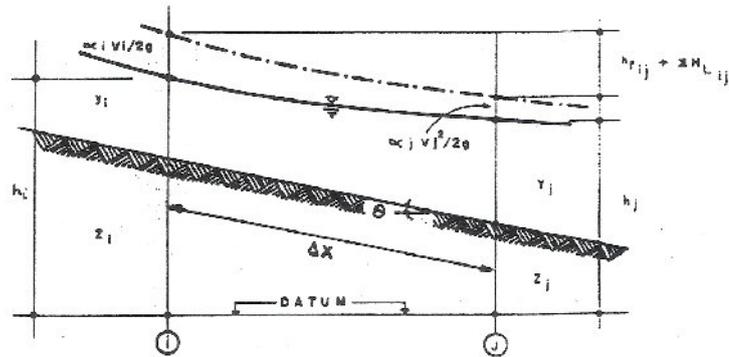


Figura 14. Diagrama de Definición de Términos del Flujo Gradualmente Variado en Canales Abiertos. Tomado de López (1998).

Las hipótesis implícitas en la deducción de la ecuación (18) son las típicas del flujo gradualmente variado y se mencionan a continuación:

- Las variaciones en profundidad se producen paulatinamente, el movimiento considera unidimensional, y con relación a sus aspectos dinámicos, la distribución de presiones en planos normales al flujo se supone hidrostática.
- La pendiente de la línea de energía en una sección cualquiera de flujo es igual a la que correspondería a un flujo uniforme pasando por esa sección con el mismo caudal y a la misma profundidad. En consecuencia, fórmulas para régimen uniforme pueden utilizarse para evaluar la pendiente S_f .
- Se consideran pendientes de fondo de pequeña magnitud, de tal manera que el seno del ángulo que expresa tal pendiente puede aproximarse a la tangente, y el coseno puede aproximarse a la unidad.
- Los contornos se consideran fijos.

2.5.4.2. Canales prismáticos

La determinación de los perfiles de agua en un canal prismático, entendiéndose por éste es un canal de alineamiento recto en donde la forma y dimensiones de la sección, la rugosidad de los contornos, y la pendiente longitudinal no varían con la distancia, es preferible trabajar con la ecuación (18) expresada en la forma siguiente:

$$Ho_i = Ho_j + (Z_j - Z_i) + \int_i^j s_f dx \quad (19)$$

En donde **Ho** representa la energía específica definida como la suma de los términos de carga de presión (**y**), y carga de velocidad ($v^2/2g$); el coeficiente α ha sido considerado igual a la unidad; y las pérdidas locales de energía han sido anuladas ya que no pueden existir por definición de canal prismático.

Para el rango de pendientes usuales existentes en la práctica, se cumple que $\tan \theta \approx \sin \theta \approx S_o$ y por tanto se puede escribir que $Z_i - Z_j = S_o \Delta x$, en donde ΔX es la distancia del tramo **ij** medida a lo largo del canal y S_o se refiere a la pendiente longitudinal del canal. Considerando además la definición para la pendiente promedio de la línea de energía S_f dada por:

$$\bar{S}_f = \frac{\int_i^j s_f dx}{\Delta x} \quad (20)$$

La ecuación (19) se transforma en:

$$Ho_i = Ho_j - S_o \Delta X + \bar{S}_f \Delta x \quad (21)$$

La cual puede resolverse para ΔX como:

$$\Delta x = \frac{Ho_j - Ho_i}{S_o - \bar{S}_f} \quad (22)$$

La ecuación (22) es la base del denominado Método Directo Paso a Paso para determinar perfiles de agua en canales abiertos. Su aplicación en la práctica está limitada a los canales prismáticos ya que el método calcula distancias (ΔX) a partir de profundidades conocidas (Y_i, Y_j).

La dificultad para obtener soluciones a la ecuación (22) está implícita en la forma de evaluar el integral de la ecuación (20). Lo que se hace normalmente es buscar una aproximación de esta integral, ya sea promediando las pendientes de la línea de energía en las secciones extremas, o promediando los elementos geométricos de estas secciones suponiendo un valor único de la pendiente de la línea de energía. En el primer caso, utilizando el promedio aritmético se obtiene:

$$\bar{S}_f = \frac{1}{2}(S_{fi} + S_{fj}) \quad (23)$$

En el segundo caso, promediando los elementos geométricos y utilizando la fórmula de Manning se tiene:

$$\bar{S}_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 \bar{R}^{4/3}} \quad (24)$$

En donde el área promedio \bar{A} , el perímetro mojado promedio \bar{P} , y el radio hidráulico promedio \bar{R} vienen definidos como:

$$\bar{A} = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \quad (25a)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \quad (25b)$$

$$\bar{R} = \bar{A} / \bar{P} \quad (25c)$$

Hay que hacer notar que como los promedios realizados son sobre magnitudes fuertemente no lineales con la distancia, ellas darán una aproximación tolerante solamente en el caso de que las secciones extremas están muy próximas o bien si las cantidades en juego varían muy poco entre las dos secciones aludidas, debido esto a condiciones de un problema particular.

La evaluación de las pendientes S_{fi} , S_{fj} puede hacerse utilizando cualquiera de las fórmulas tradicionales del régimen uniforme. Por ejemplo si se adopta la fórmula de Manning se tiene:

$$S_{fi} = \frac{Q^2 n_i^2}{A_i^2 R_i^{4/3}} \quad ; \quad S_{fj} = \frac{Q^2 n_j^2}{A_j^2 R_j^{4/3}} \quad (26)$$

Si por el contrario se usa la fórmula de Chezy se tiene:

$$S_{fi} = \frac{Q^2}{C_i^2 A_i^2 R_i} \quad ; \quad S_{fj} = \frac{Q^2}{C_j^2 A_j^2 R_j} \quad (27)$$

En donde n y C representan los coeficientes de Manning y Chezy, respectivamente.

Una vez definidos la forma de evaluar \bar{S}_f y la fórmula de régimen uniforme a utilizar, la aplicación de la ecuación (22) es sumamente sencilla. Partiendo de los datos conocidos de profundidad de control, gasto, geometría y rugosidad del canal prismático, el procedimiento de cálculo supone una profundidad y calcula, mediante la ecuación (22), la distancia a la cual ella se produce. El Método de cálculo directo (no iterativo) y procede de sección en sección, paso a paso, hasta barrer el tramo de estudio deseado.

2.5.4.3. Algoritmos de cálculo

La solución del flujo permanente gradualmente variado en canales abiertos requiere de la presencia de un punto de control en donde se inicie el cálculo del perfil de agua correspondiente. Suponiendo, para efectos de la explicación, que el control está en la sección j (aguas abajo), la ecuación (1) que establece el balance global de energía puede ser rescrita como:

$$H_j = Z_i + Y_i + \alpha_i \frac{V_i^2}{2g} - h_{f_{ij}} - \sum H_{L_{ij}} \quad (28)$$

En donde H_j representa la energía total disponible (valor conocido) en la sección de control j .

Utilizando la ecuación de continuidad $V = Q/A$ y con ayuda de las ecuaciones

$$\alpha = \frac{(\sum A_k)^2}{(\sum K_k)^3} \sum \left(\frac{K_k^3}{A_k^2} \right) = f_1(Y) \quad (29),$$

$$h_{f_{ij}} = \frac{\Delta X}{2} f_2(Y_i, Y_j) \quad (30)$$

$$\text{y } \sum H_{L_{ij}} = f_3(Y_i, Y_j) \quad (31),$$

la expresión anterior se transforma en:

$$H_j = Z_i + Y_i + f_1(Y_i) \frac{Q^2}{2g A_i^2} - \frac{\Delta X}{2} f_2(Y_i, Y_j) - f_3(Y_i, Y_j) \quad (32)$$

Esta ecuación nos indica que, conocidos los valores de:

- a. Energía total y Profundidad de Control en la sección j.
- b. Geometría y rugosidad de las subsecciones en que se ha dividido la sección i.
- c. Caudal y longitud del tramo considerado ij.
- d. Coeficientes de pérdidas locales en el tramo ij.

La ecuación (32) es una única función de la variable Y_j .

La solución de la ecuación (32) no es sencilla por la complejidad de las funciones f_1 , f_2 y f_3 que son no lineales en la incógnita Y_j requiriéndose en consecuencia del uso de un método de tanteo y error mediante el cual se suponga un valor de la profundidad y i y se verifique si la ecuación (32) es satisfecha.

Una gran variedad de métodos numéricos pueden aplicarse para obtener soluciones a la ecuación (32). El problema matemático se plantea en la forma de encontrar las raíces de la función $F(y_i) = 0$, definida como:

$$F(Y_i) = Z_i + Y_i + f_1(Y_i) \frac{Q^2}{2gA_i^2} - H_j - \frac{\Delta X}{2} f_2(Y_i, Y_j) - f_3(Y_i, Y_j) = 0 \quad \text{ecuación (33)}$$

2.5.4.3.1. Método de Newton

Un método iterativo de rápida convergencia, el Método de Newton, establece que una mejor aproximación a la incógnita Y_j en la iteración $m + 1$ puede obtenerse aplicando la fórmula de recurrencia:

$$Y_i^{m+1} = Y_i^m - \left[\frac{F(Y_i)}{\partial F(Y_i) / \partial Y_i} \right], \quad \text{para } m = 0, 1, 2 \quad (34)$$

En donde el superíndice “m” se refiere a que el término está evaluado en la iteración “m”.

La complejidad del método reside en la necesidad de obtener una expresión para la derivada de la función, respecto a la variable incógnita Y_i . La evaluación de esta derivada conduce a las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial F}{\partial Y_i} = 1 - F_i^2 - \frac{\Delta X}{2} \frac{df_2}{dY_i} \quad (35)$$

En donde:

$$F_i^2 = f_1(Y_i) \frac{Q^2 T_i}{g A_i^3} \quad (36)$$

$$\frac{dA_i}{dY_i} = T_i \quad (37)$$

$$\frac{df_2}{dY_i} = -2 \left(\frac{Q^2}{\sum K_k} \right)_i^2 \left[\frac{1}{A_i} \left(\frac{5}{3} T_i - \frac{2}{3} R_i \frac{dP_i}{dY_i} \right) - \frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dY_i} \right] \quad (38)$$

Y adicionalmente se ha supuesto la independencia de Y_i de las expresiones f_1, f_3 ; por tanto:

$$\partial f_1 / \partial Y_i = 0 \quad (39)$$

$$\partial f_3 / \partial Y = 0 \quad (40)$$

La fórmula de recurrencia definida por la relación (34) en conjunto con las ecuaciones (33), (36) y (37), respectivamente, permiten que para un valor inicial supuesto de profundidad en la sección i , Y_i , se puedan obtener automáticamente valores mejorados de la incógnita hasta satisfacer un cierto criterio de terminación, tal como:

$$|Y_i^{m+1} - Y_i^m| < \epsilon, \quad \text{en donde } \epsilon \text{ es un número muy pequeño.}$$

El método de Newton ha sido aplicado con éxito para obtener perfiles de agua en canales prismáticos o no prismáticos de geometría regular, alguno de los cuales se reportan posteriormente en este trabajo.

Un inconveniente de la aplicación del método de Newton puede deducirse observando la ecuación (35). Para valores de profundidad cercanos a la altura crítica, el número de Froude se aproxima a la unidad, y debido a que el término df^2/dy_i es usualmente bastante muy pequeño menor que uno, la derivada de la función df^2/dy_i puede tender a cero, haciendo consecuencia incongruente la corrección establecida en la fórmula de recurrencia dada por la ecuación (34). Por lo tanto, el método de Newton puede presentar problemas de convergencia cuando se utiliza para calcular perfiles de agua cuyo régimen de flujo está cercano al régimen crítico ($F \approx 1.0$) ó

en aquellos otros perfiles en donde en algún momento del proceso iterativo se alcance una profundidad cercana a la altura crítica.

La interpretación gráfica de este problema se ilustra en la figura 15. La tangente a la curva $F(Y_i)$ se hace casi horizontal conduciendo esto a la obtención de una profundidad Y_i^2 negativa y bastante alejada de la solución.

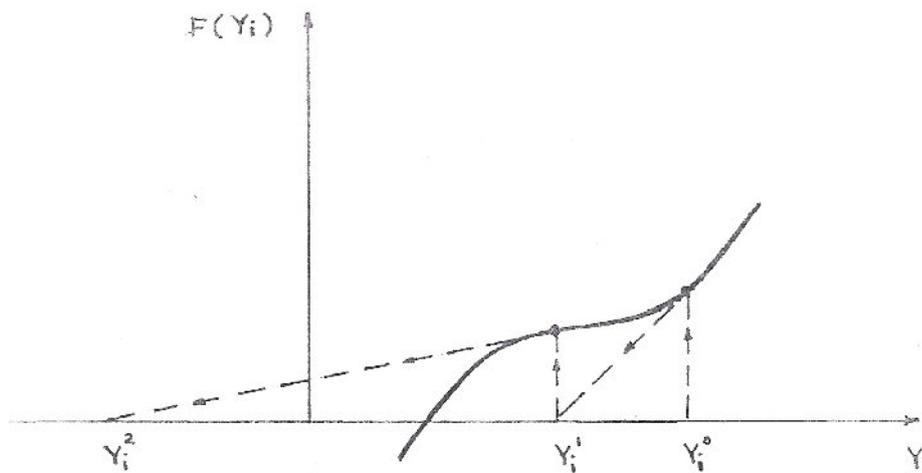


Figura15. Algoritmo de Newton. Tomado de López (1998).

2.5.4.4. Valores iniciales

Uno de los pasos más importantes cuando se utiliza un método de aproximaciones sucesivas como el descrito anteriormente, es la selección de un buen valor inicial, para dar comienzo al proceso iterativo. En algunos casos, como en el método de Newton, la selección de un valor inicial lo suficientemente cercano al entorno de la raíz, es un requisito indispensable para garantizar la convergencia del método. Pero sin embargo esta selección va a determinar la rapidez de la convergencia. Debido a la presencia de un control hidráulico, la selección del valor inicial no es un inconveniente cuando se pretende resolver la ecuación (33).

Al requerirse siempre una profundidad de control conocida para calcular el perfil de agua, este será el valor inicial a utilizar cuando se comience a iterar en la sección vecina, ya sea mediante el algoritmo dado por la ecuación (34) ó por las ecuaciones (41) y (44). Como la diferencia en profundidades entre dos secciones vecinas no debe ser muy grande, este valor en la mayoría de los casos está lo suficientemente cerca de la raíz para conseguir la convergencia.

Una vez encontrada la primera profundidad, este será el nuevo valor inicial a utilizar para las iteraciones en la próxima sección; el procedimiento se repite sucesivamente para el resto de las secciones de cálculo.

Procedimiento, utilizando esta formulación, para las experiencias numéricas que se reportan en este trabajo, el método de Newton no requiere usualmente de más de 3 ó 4 iteraciones para encontrar la solución con un error permisible en los niveles de agua de 0.1mm., mientras que el método de la Bisección utiliza un promedio de 20 a 30 iteraciones.

2.5.4.5. Controles hidráulicos

El hecho de que una perturbación pueda viajar hacia aguas abajo en un régimen de flujo subcrítico ($F < 1$) implica que este tipo de flujo está controlado por las condiciones aguas abajo. Por el contrario, si el flujo es supercrítico, la perturbación no puede desplazarse hacia aguas arriba porque su velocidad de propagación es menor que la velocidad del flujo ($F > 1$) y por lo tanto sólo puede ser controlado por las condiciones aguas arriba.

Uno de los problemas más importantes en la determinación de los perfiles de agua en canales abiertos es la identificación del tipo de control que se ejerce y su ubicación en lo que se denomina sección de control, entendiéndose por esta como aquella sección en donde existe una relación única conocida entre el gasto y la profundidad.

Las estructuras hidráulicas como vertederos en nuestro caso representan secciones de control artificial. La altura crítica puede ser un control hidráulico en las caídas o escalones, contracciones y quiebres en la pendiente de un canal. La altura normal puede constituir un control de fricción aguas arriba en un canal largo de pendiente suave y aguas abajo en un canal de pendiente pronunciada.

En canales artificiales las secciones de control se presentan en las entradas y en las salidas de los canales, y en los cambios de pendiente cuando este se produce de un canal de pendiente fuerte a uno de pendiente suave. La compuerta de un canal constituye un control hidráulico tanto para el flujo aguas arriba como para el flujo aguas abajo. En la figura 16 se presentan algunas secciones de control posibles en un canal artificial. El cálculo de los perfiles de aguas debe iniciarse en la sección de control y proceder en la dirección en que se ejerce el control. Por lo tanto los perfiles subcríticos se calculan en dirección hacia aguas arriba mientras que los supercríticos en dirección hacia aguas abajo. *La flecha muestra las direcciones de cálculo para algunos perfiles tipo que se desarrollan en canales prismáticos.*

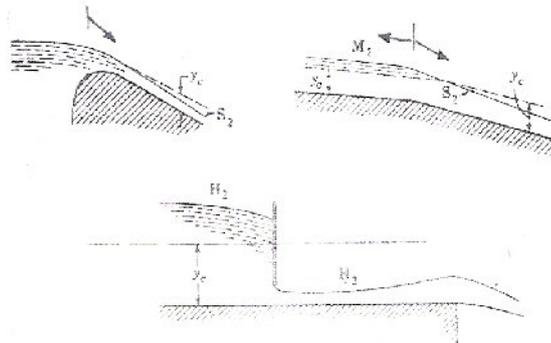


Figura 16. Ejemplos de Secciones de Control. Tomado de López (1998).

2.5.4.6. Ejemplos de aplicación en canales de geometría regular

A continuación se describen algunos casos en donde el método de Newton ha sido aplicado para la obtención de los perfiles líquidos.

Flujo Subcrítico en un Canal Prismático

Las características del canal prismático son:

Sección rectangular	$b = 10.0 \text{ m.}$
Pendiente longitudinal	$S = 0.001$
Coefficiente de Manning	$n = 0.020$
Caudal	$Q = 100.0 \text{ m}^3/\text{s}$

Con esta información la profundidad crítica y normal vienen dadas por:

$$y_c = 2.17 \text{ m.}$$

$$y_o = 3.79 \text{ m.}$$

La sección de control está ubicada aguas abajo (flujo subcrítico) y la profundidad de control en esta sección fue fijada arbitrariamente como $y = 6.0 \text{ m.}$, por tanto el perfil que se quiere calcular es un perfil tipo M1.

Se seleccionaron 81 secciones ($N = 81$) espaciadas cada 100 metro ($\Delta X = 100$) $\Delta x = y$ observar diferencia. A continuación se utilizó el programa de computadoras que se describe posteriormente comenzándose el proceso iterativo en la última sección aguas abajo donde la profundidades es conocida, ($y = 6.0$), y procediéndose en la dirección aguas arriba hasta cubrir las 81 secciones.

El perfil calculado se indica en la figura 17

2.5.4.6.1. Flujo supercrítico en un canal prismático de pendiente suave

Con la misma información del caso anterior se seleccionó una profundidad inicial (control) por debajo de la altura crítica e igual a $y = 0.10$ m. El perfil que se desea calcular es entonces del tipo M3 y la sección de control está ubicada aguas arriba (flujo supercrítico).

Datos adicionales son:

$$N = 74 \text{ secciones}$$

$$\Delta X = 4 \text{ m.}$$

$$L = 292 \text{ m.}$$

Perfil de desarrollo corto

El método de cálculo procede en la dirección aguas abajo y los resultados se indican en la figura 18.

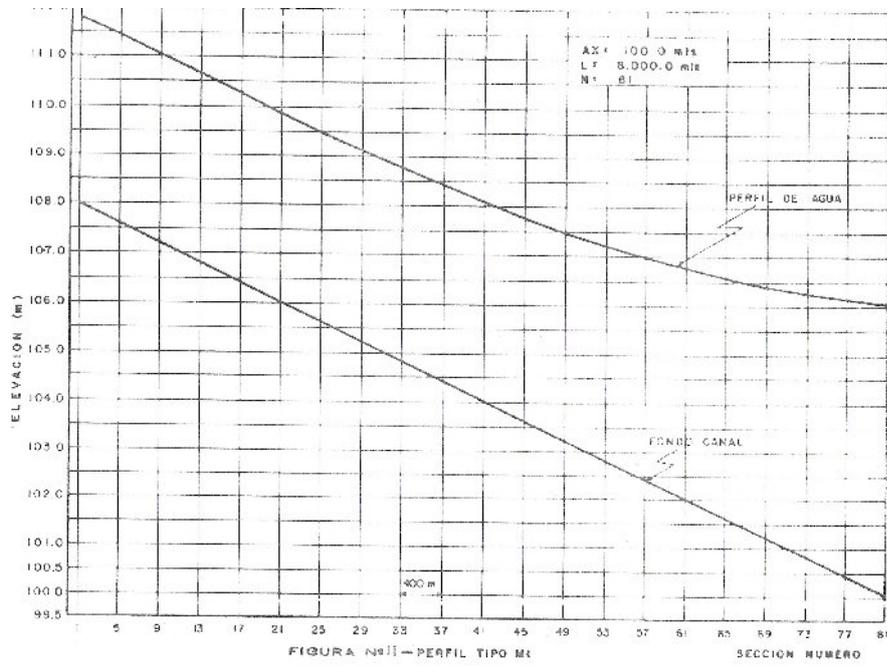


Figura 17. Perfil tipo M1. Tomado de López (1998).

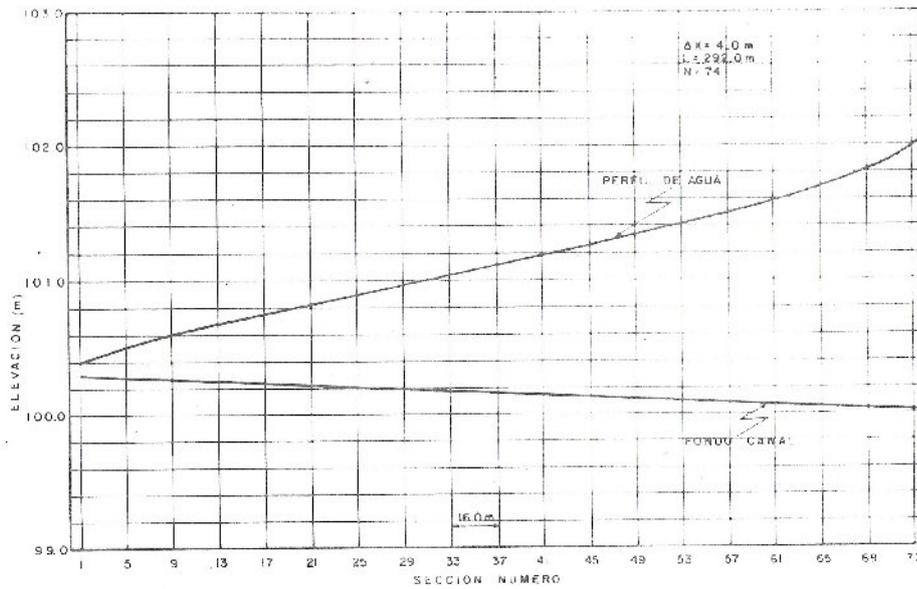


Figura 18. Perfil tipo M3. Tomado de López (1998).

2.5.4.6.2. Flujo supercrítico en un canal prismático de pendiente fuerte

Las características del canal son:

$$\begin{aligned}S_o &= 0.02 \\B &= 10.0 \text{ m (Sección rectangular)} \\N &= 0.013 \\Q &= 100.0 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

La profundidad normal y la profundidad crítica son:

$$\begin{aligned}y_0 &= 1.03 \text{ m.} \\y_c &= 2.17 \text{ m.}\end{aligned}$$

Para el caso de flujo supercrítico la sección de control está ubicada aguas arriba. La profundidad de control seleccionada tiene un valor de 2.15 m., comprendida entre la normal y la crítica. Por lo tanto, el perfil que se desea calcular es del tipo S2.

Datos adicionales:

$$N = 101 \text{ secciones}$$

$\Delta X = 1.0 \text{ m.}$ (Tuvo que hacerse bien pequeño para que calcula correctamente el S2).

El perfil de agua calculado se muestra en la figura 19.

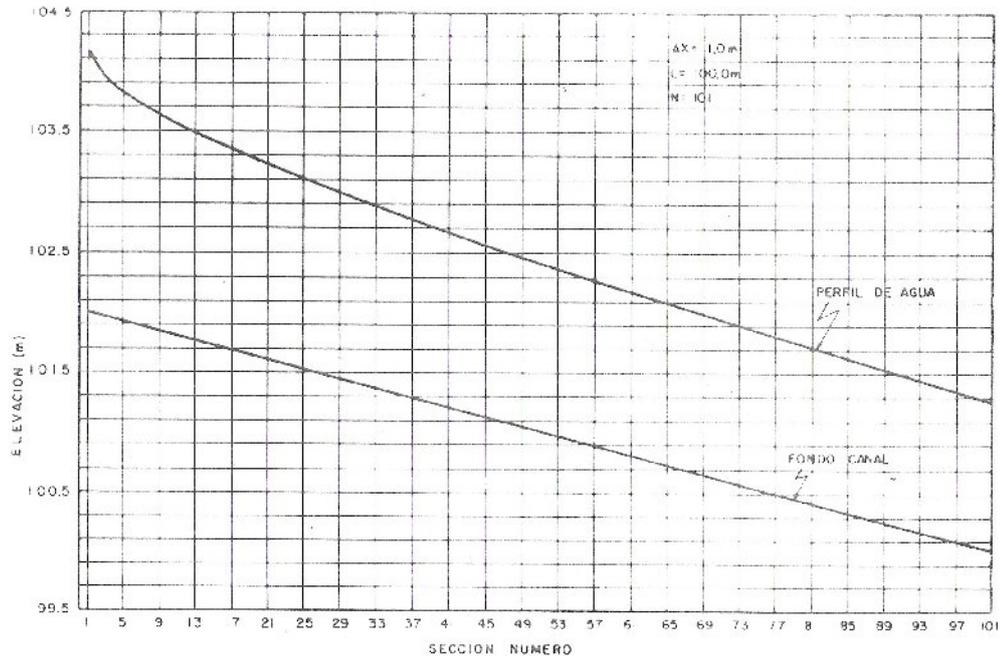


Figura 19. Perfil tipo S2. Tomado de López (1998).

2.5.4.6.3. Datos de entrada

2.5.4.6.3.1. Lectura del disco duro

Se debe crear antes de ejecutar el programa un archivo de datos con un nombre tal como PERFIL1.DAT o similar, el cual debe contener la siguiente información (Nota: las variables a definir en la misma línea se separan con espacio en blanco):

Línea No.	Variable	Significado	Formato
1	TOTALX	Distancia Total del tramo en estudio, en metros.	
1	JMAX	Número de secciones de cálculo.	
1	ITMAX	Número de iteraciones permisibles.	
1	IPRINT	Control de impresión. = 1 imprime valores parciales. = 0 imprime sólo resultados finales.	
1	CONTRL	Controla la dirección de cálculo del perfil. = 1 flujo subcrítico = 2 flujo supercrítico	
1	ERROR	Error permisible	Libre

		(Se recomienda igual a 0.001)	
1	IPRISM	Control para el tipo de canal considerado. = 1 canal prismático = 2 canal no-prismático.	Libre
1	ISEC	Control del tipo de sección transversal. = 1 trapecial, rectangular o triangular. = 2 circular = 3 herradura	Libre
1	ISUB	Control del método iterativo. =1 método de Newton =2 método de Bisección	Libre
1	DELTA0	Valor inicial de y en el método de Bisección (se recomienda $\Delta y=0.1$).	Libre
1	ICOEF	Control del coeficiente de Manning. =0 no hay curva de n vs. y =1 si hay curva de n vs. y	Libre
2 (solo si IPRISM=1)	SO	Pendiente de fondo del canal en m/m.	Libre
3 (solo si IPRISM=1 ISEC=1)	ZZ1	Pendiente del talud por 1 metro en vertical.	Libre
4 (solo si IPRISM=1, ICOEF=0)	CC	Coefficiente de Manning.	Libre
5 (solo si IPRISM=1, ISEC=1)	TT	Ancho base de la sección	Libre
6 (solo si IPRISM=1 ISEC=2)	DD	Diámetro del conducto circular, en metros.	Libre
7 (solo si IPRISM= ISEC=3)	1 BO	Ancho base de la sección en herradura, en metros.	Libre
7 (solo si IPRISM=1 ISEC=3)	HO	Altura de la sección en herradura, en metros.	Libre
7 (solo si IPRISM=1 ISEC=3)	DO	Diámetro del semi- círculo, en metros.	Libre

8 (solo si IPRISM=1)	Z(JMAX)	Cota de fondo de la Última sección.	Libre
9 (solo si IPRISM=2)	DX(J) J=1,JMA X-1	Distancia entre secciones de cálculo, en metros (Separar los valores con espacio en blanco).	Libre
10 (solo si IPRISM=2, ISEC=1)	B(J) J=1,JMA X	Ancho base de la sección trapezoidal, en metros (Separar los valores con espacio en blanco).	Libre
11 (solo si IPRISM=2)	Z(J) J=1,JMA X	Cotas de fondo de las secciones de cálculo, en metros (separar los valores con espacio en blanco).	Libre
12 (solo si IPRISM=2 ISEC=1)	ZZ1(J) J=1,JMA X	Pendiente lateral del talud de las secciones de cálculo, por 1 metro en vertical (separar los valores con espacio en blanco).	Libre
13 (solo si IPRISM=2 ICOEF=0)	COEF(J) J=1,JMA X	Coefficientes de Manning para las secciones de cálculo (separar con espacio en blanco).	Libre
14 (solo si IPRISM=2 ISEC=2)	D(J) J=1,JMA X	Diámetros de las secciones de cálculo, en metros (separar con espacio en blanco)	Libre
15 (solo si IPRISM=2 ISEC=3)	B(J) J=1,JMA X	Anchos base de las secciones en herradura, en metros (separar con espacio en blanco)	Libre
16 (solo si IPRISM=2 ISEC=3)	ALT(J) J=1,JMA X	Alturas de las secciones en herradura, en metros (separar con espacio en blanco)	Libre
17 (solo si IPRISM=2 ISEC=3)	D(J) - J=1,JMA X	Diámetros de las secciones en herradura, en metros (separar con espacio en blanco).	Libre
18 (solo si ICOEF=1)	NPC	Número de pares de puntos en la curva de rugosidades.	Libre
19 (solo si ICOEF=1)	YO(I) CO(I) I=1,NPC	Valores de profundidad y rugosidad, en la curva de rugosidades (separar con espacio en blanco)	Libre

Tabla 3. Variables y sus significados de los datos de entrada por el archivo de texto. Tomado de López (1998).

2.5.4.6.3.2.Lectura por pantalla

Las siguientes variables deberán ser definidas por la pantalla:

- Caudal (m³/s.).
- Cota o nivel del agua en la sección de control en metros.

Dependiendo del tipo de régimen de flujo el programa asigna este valor del nivel a la sección No 1 (flujo supercrítico) o a la sección No. JMAX (flujo subcrítico).

2.6. Pendiente de compensación

A juicio de Suárez (1993), resulta prácticamente imposible efectuar un cálculo preciso de la pendiente de compensación, a causa de la gran cantidad de variables involucradas en todos los problemas relativos a los cauces naturales con presencia de transporte de sólidos, por lo que es preferible para el ingeniero proyectista utilizar fórmulas y métodos empíricos, basados en la medición de las pendientes antes y después de construidas las presas de corrección torrencial, utilizando un número pequeño de variables de correlación, lo que permite obtener resultados confiables, garantizados por la verificación en numerosas experiencias reales de campo, lo cual es lo que requiere el ingeniero en busca de soluciones prácticas.

Seguidamente se exponen cuatro métodos de estimación de la pendiente de compensación, basados en mediciones de campo.

2.6.1. Fórmula de Romiti

La pendiente de compensación S_C viene expresada por:

$$S_C = \frac{1}{3 + \frac{1-1,5s}{s+s^3} \left(\frac{d_{\max}}{d_c} \right)^2 \left(\frac{b}{b_c} \right)^2}$$

Siendo:

- S : Pendiente original del cauce de la presa.
- d_{\max} : tamaño máximo de las partículas del cauce(m).
- d_c : tamaño máximo común (d_{50}) de las partículas del cauce(m).
- b : Ancho original del cauce en creciente (m).
- b_c : Ancho original del cauce en creciente después de la colmatación de la presa (m).

El inconveniente que presenta la utilización de esta fórmula es la determinación de d_{\max} y de cuyos valores afectan de una manera importante el resultado, y están sujetos al criterio personal de evaluación del calculista.

2.6.2. Experiencia japonesa

La experiencia Japonesa en las labores de corrección de cauces torrenciales, permite estimar la pendiente de compensación de la manera siguiente:

$$\frac{1}{2} \alpha \leq \alpha_c \leq \frac{2}{3} \alpha$$

Siendo:

- α : Angulo correspondiente a la pendiente original(°)
- α_c : Angulo correspondiente a la pendiente del cauce(°)

2.6.3. Experiencia italiana

Según la experiencia Italiana, basada en la medición de la pendiente de compensación en una serie de torrentes, se tiene que:

$$S_c = 0.66S$$

2.6.4. Experiencia norteamericana

En los Estados Unidos, con base en las observaciones de campo, se recomienda utilizar:

$$S_c = 0.70S$$

2.6.5. Suárez

Recomienda estimar el valor de la pendiente de equilibrio de una manera práctica utilizando la ecuación:

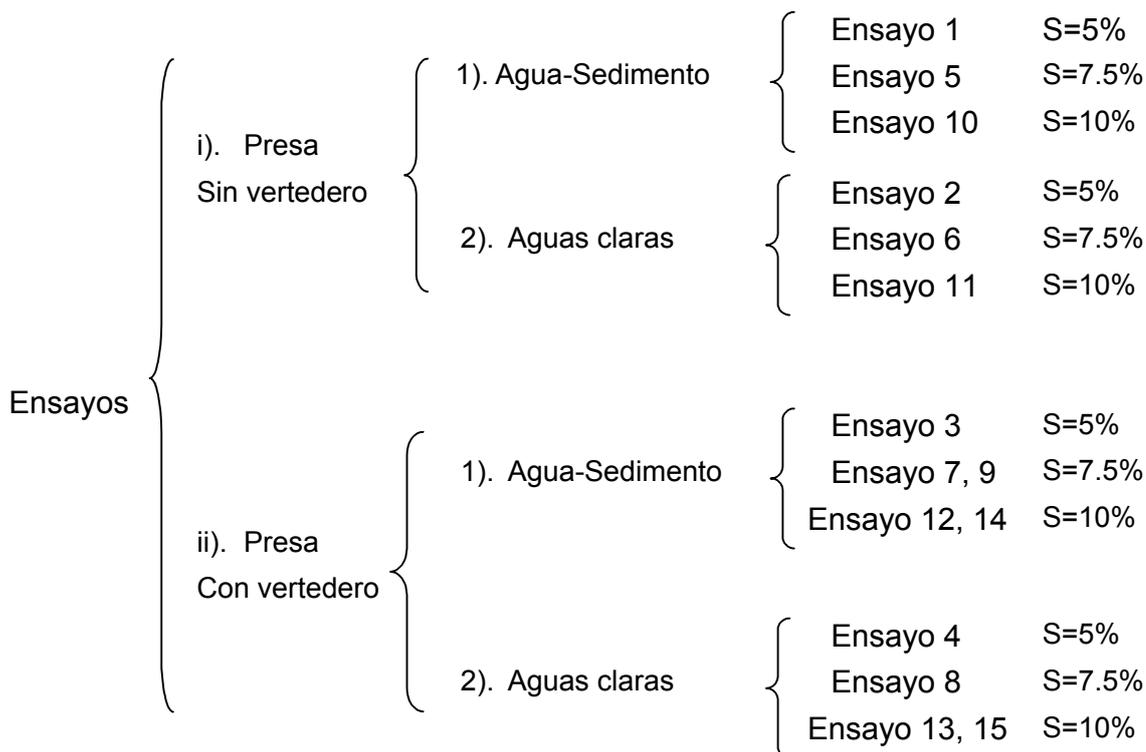
$$S_c = 0.65S$$

3. MARCO METODOLOGICO

El Proyecto se enmarcó en las líneas de investigación que tiene el Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF) de la Universidad Central de Venezuela (UCV), sobre arrastre de sedimentos y pendientes de equilibrio.

3.1. Alcances

El equipo humano constaba de tres (3) estudiantes del pregrado de Ingeniería Hidrometeorológica y uno (1) de postgrado del Instituto de Mecánica de Fluidos, y los respectivos tutores. El autor del presente trabajo junto con el estudiante de postgrado, trabajaron en el área de flujo de sedimento granular (arena). Para el presente proyecto se acordó la realización junto con el estudiante de postgrado de 12 experiencias: 3 con caudal sólido y agua y 3 con aguas claras, con presa cerrada con y sin vertedero para las pendientes de 5%, 7.5% y 10% (figura 20). Adicionalmente se realizaron dos (2) ensayos con el doble del caudal sólido y uno (1) con aguas claras.



Nota: los ensayos (9), (14) y (15) son los realizados suministrando el doble de la carga de sedimentos

Figura 20. Esquema que presenta la distribución de los 15 experimentos.

En las reuniones de planificación que le antecedieron al desarrollo de la parte experimental, se evaluaron las estructuras, equipos, herramientas e insumos necesarios para el buen funcionamiento del proyecto y se determinó realizar un inventario de lo existente y de las cosas que era necesario reparar o adquirir. Previamente el grupo perteneciente al flujo de lodos, ya había realizado la gestión para la reparación y adecuación de las bombas, los tanques de alimentación y con base en dicha gestión, se repararon y adecuaron las dos bombas existentes. Una vez adecuadas las bombas se realizaron las siguientes actividades correspondientes a las tareas asignadas de acuerdo a un listado de necesidades:

- a Adecuación del ancho del canal. Las bajas dotaciones de circulación obtenidas con las bombas existentes (2.7 a 3.1 Lps) condujeron a tomar la medida de reducir el ancho de la sección, a fin de obtener una lámina de flujo observable. Dicho trabajo lo realizó el personal adscrito al taller del IMF.
- b Adecuación del Fondo del canal. De igual forma, una manera de obtener una lámina observable fue aumentando de rugosidad, lo que se logró mediante la instalación en el fondo liso de una capa fija de material granular de 2 cm de diámetro promedio.
- c Selección y adecuación del sedimento existente. Análisis granulométrico de varios materiales existentes en el laboratorio del IMF. Se seleccionó un material granular (arena), que por sus características físicas observables y abundancia, podía ser utilizado como caudal sólido. Dicha arena fue lavada previamente para eliminar al máximo los finos y posteriormente se realizó su granulometría respectiva, en el laboratorio de suelos del mismo Instituto (IMF).
- d Diseño y construcción de las presas. Se diseñaron presas cerradas completamente y con vertederos, con lámina de acrílico transparente, a fin de observar la columna sedimentada junto a la presa. Las presas fueron construidas por personal adscrito al IMF de la UCV.
- e Adecuación de una tolva para la alimentación de sedimentos. La necesidad de tener un caudal sólido constante para alimentar el canal, llevó a la adecuación de una de las tolvas existentes en el IMF. La tolva fue construida y adecuada en los talleres del Instituto por el personal adscrito en conjunto con mi persona y el estudiante de postgrado.
- f Cálculo del caudal de alimentación para graduar la tolva. Mediante varias de las expresiones existentes en la literatura, se calculó la capacidad de arrastre para las pendientes seleccionadas y la granulometría realizada, a fin de obtener un gasto

menor a esta capacidad de arrastre lo que conllevó a que todo el material fuese transportado y el efecto de sedimentación fuera sólo por función de las presas.

- g Inicio del proceso experimental. Una vez cubiertas las anteriores etapas, se dio inicio a los diferentes experimentos que se especificaron anteriormente y se ilustran en la figura 20.
- h Posterior a la realización de los ensayos experimentales, recolección de datos de los mismos, se procedió a la comparación de los perfiles de agua inicial obtenidos experimentalmente y los obtenidos simulados con el programa “PERFIL”, para las diferentes pendientes a fin de establecer relación entre los mismos y corroborar los ensayos realizados desde el punto de vista hidráulico.

4. MARCO EXPERIMENTAL

4.1. Canal de ensayo para flujo torrencial

La experiencia se llevó a cabo en un canal existente en laboratorio de hidráulica del Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad Central de Venezuela.

El canal presenta la facilidad experimental de poder graduar su pendiente mediante un mecanismo que permite rotar la estructura en torno a un pivote (indicado por 1 en la figura 21).



Figura 21. Foto del canal de laboratorio donde puede apreciarse: (1) pivote que permite graduar la pendiente. (2) Ajuste del ancho mediante la instalación de una margen derecha en madera. (3) Instalación del dique (presa) transversa a la corriente. (4) Obtención de la pendiente final en una experiencia, después de la sedimentación del lecho.

Graduar la pendiente del canal se hace necesario para el desarrollo de la experiencia, en razón a que la mayor parte de las estructuras construidas en Vargas se ubicaron en torrentes cuyas pendientes oscilan entre 2,5 y 10%.

El canal rectangular tiene las tiene las siguientes dimensiones:

Largo (L)=8,0 m.

Ancho (B)=0,30 m (después de la adecuación).

La presa cerrada rectangular tiene las tiene las siguientes dimensiones:

Altura (H)=0,15 m.

Ancho (B)=0,30 m.

La presa rectangular con vertedero tiene las tiene las siguientes dimensiones:

Altura (H)=0,15 m.

Ancho (B)=0,30 m.

Dimensiones del vertedero

Altura (H)=0,07m.

Ancho (B)=0,22m.

4.1.1. Granulometría del material utilizado para adecuar el fondo del canal experimental

La tabla 4 y la figura 22 presentan la granulometría del triturado utilizado.

4.2. Tolva de alimentación

Para la graduación de la tolva de sedimentos, fue preciso calcular inicialmente la capacidad de transporte. Se empleó la expresión de Engelund Hansen (USGS, 1989), la cual da resultados aceptables para transporte de arena. Como se puede observar en la tabla 5, un caudal sólido inferior a $2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal sólido crítico) garantiza para todas las pendientes, según ésta expresión, que el sedimento está por debajo de la capacidad de arrastre y consecuentemente será transportado hasta la zona de flujo gradualmente variado. Se debe entonces lograr una determinada abertura de válvula que permita como máximo el paso de un caudal sólido algo menor. Como el volumen del balde utilizado para la calibración es de 0.00286 m^3 , un gasto correspondiente a 1 balde/minuto ($4.7605 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$), garantiza dicho caudal.

4.2.1. Calibración de la tolva de sedimentos

La tolva de arrastre de sedimentos se calibró mediante prueba y error, abriendo y cerrando la válvula para lograr caudales iguales y ligeramente inferiores al caudal propuesto, esto es, que el balde fuera llenado por la arena proveniente de la tolva en un período ligeramente igual a un minuto. El proceso de calibración se ilustra en la figura 23.

4.3. Granulometría del sedimento utilizado

La tabla 6 y la figura 24 presentan la granulometría de la arena utilizada. El D_{50} interpolado en la figura 24 es el utilizado en la expresión de Engelund Hansen, contenida en la tabla 5.

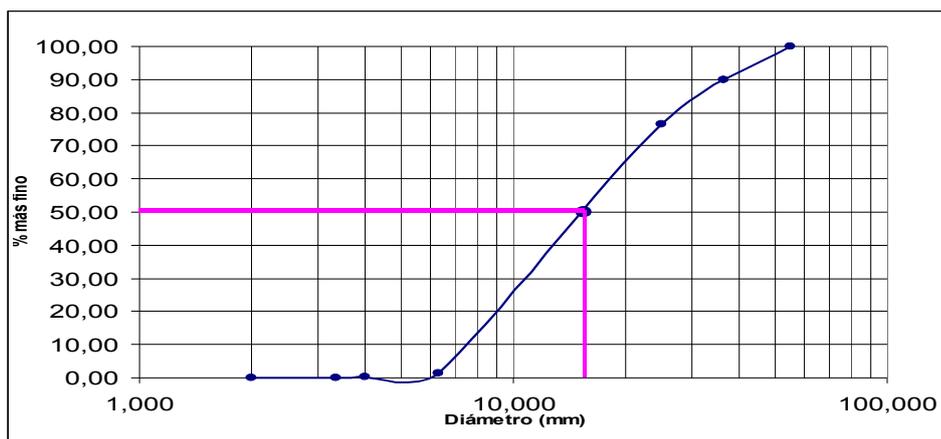


Figura 22. Distribución granulométrica del material utilizado para la adecuación del fondo del canal.

Fecha (toma de la muestra):		Miercoles, 09 de Julio de 2008				
Fecha (procesamiento de la		Miercoles, 09 de Julio de 2008				
Peso total =		601.62				
Peso tara =		33.22				
Tamiz #	Diámetro del tamiz mm Pulg	Peso retenido g	% retenido	% acumulado	% más fino	
	55.000 22.000	0	0.00	0.00	100,00	
1	25.000 1.0000	141,93	23,60	23,60	76,40	
1/4	6.300 0.2500	450,93	74,99	98,59	1,41	
5	4.000 0.1570	7,32	1,22	99,81	0,19	
6	3.350 0.1320	0,49	0,08	99,89	0,11	
10	2.000 0.0787	0,16	0,03	0.73	0,09	
Pasa		0,52	0,09	100.00	0,00	
Total	481.54	100.00			
% de error	0.11%	< 1%, Ok			

Tabla 4. Granulometría del material utilizado para la adecuación del fondo del canal.

γ_s	=	2650 kg/m ³	$q_s = \frac{15.54U^2(dS_f)^{3/2}}{D_{50}}$			
$d_{0.36}$	=	0.15				
d_{50}	=	0.735				
d_{90}	=	1.58				
v_{20^0}	=	0.0000010070				

S	d	q	q_s	Q_s	Propuesto Para alimentación (Un balde/minuto)	
m/m	m	m ³ /s	kg/s*m V/B	m ³ /s	m ³ /s	Chequeo
5%	0.0229	0.003	2.0072	0.000227	4.76047E-05	<Q_s, Ok.
7.5%	0.0187	0.003	3.1042	0.000351	4.76047E-05	<Q_s, Ok.
10%	0.0153	0.002	3.5776	0.000405	4.76047E-05	<Q_s, Ok.
Volumen balde					0.002856284	

Tabla 5. Cálculo de la capacidad de transporte mediante la fórmula de Engelund-Hansen para las diferentes pendientes y propuesta de un caudal sólido menor que dicha capacidad.

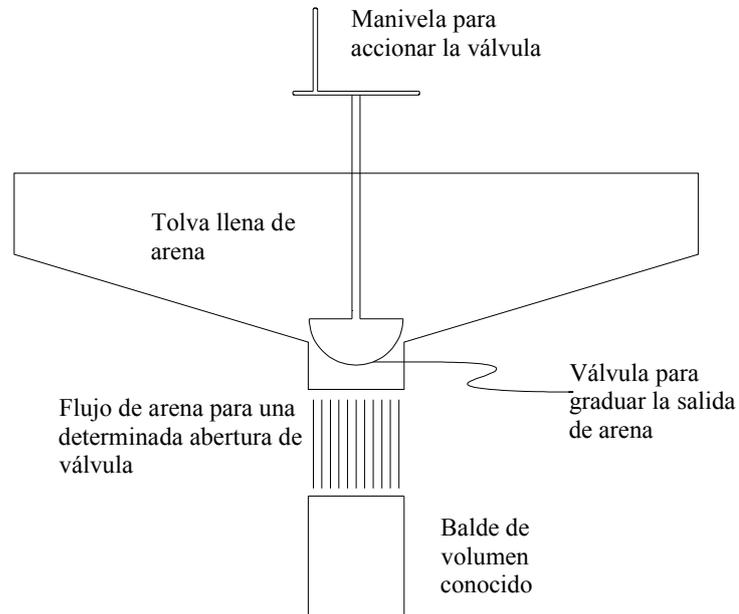


Figura 23. Esquema que ilustra la tolva con válvula reguladora (para graduar la salida de la arena) que fue utilizada en los experimentos y el proceso que permitió el paso de un gasto sólido inferior a la capacidad de arrastre.

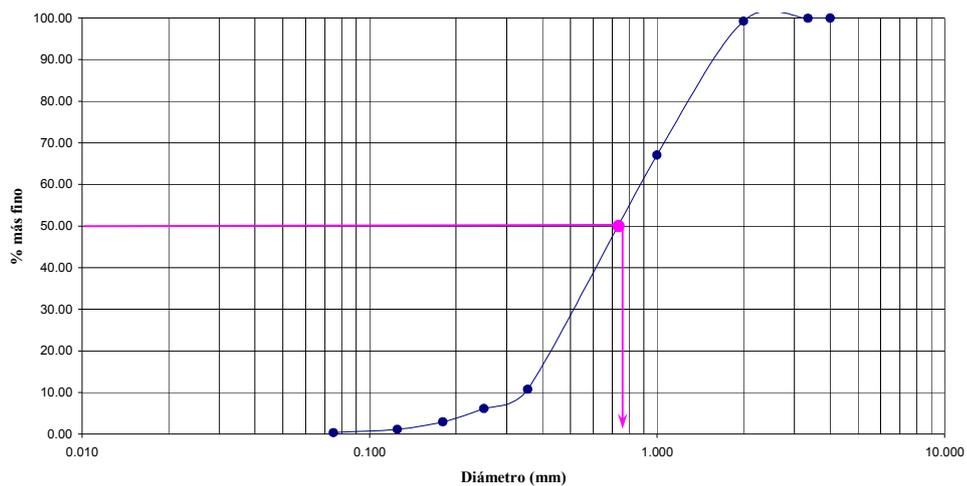


Figura 24. Distribución granulométrica del material del canal de laboratorio, del martes 17 de junio de 2008, IMF de La UCV.

Fecha (toma de la muestra):		Martes, 17 de Junio de 2008				
Fecha (procesamiento de la muestra):		Martes, 17 de Junio de 2008				
Peso total = 482.09 gr						
Peso tara = 33.21 gr						
Tamiz #	Diámetro del tamiz	Peso retenido	% retenido	% acumulado	% más fino	
	mm Pulg	g				
1	25.000 1.0000	0	0.00	0.00	100.00	
1/4	6.300 0.2500	0	0.00	0.00	100.00	
5	4.000 0.1570	0	0.00	0.00	100.00	
6	3.350 0.1320	0.23	0.05	0.05	99.95	
10	2.000 0.0787	3.29	0.68	0.73	99.27	
18	1.000 0.0394	154.94	32.18	32.91	67.09	
45	0.355 0.0139	271.28	56.34	89.24	10.76	
60	0.250 0.0096	22.2	4.61	93.85	6.15	
80	0.180 0.0070	15.28	3.17	97.03	2.97	
120	0.125 0.0049	8.88	1.84	98.87	1.13	
200	0.075 0.0029	3.73	0.77	99.64	0.36	
Pasa		1.71	0.36	100.00	0.00	
Total (gr).....		481.54	100.00			
% de error.....		0.11% < 1%, Ok				

Tabla 6. Granulometría de la arena utilizada en los experimentos

4.4. Ensayos realizados en el canal de laboratorio y análisis de resultados

4.4.1. Pendiente 5%

4.4.1.1. Ensayo 1: Cerrada sin vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,027m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,049
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,4m/s
Q (caudal)	0,0031 m ³ /s
S (pendiente)	0,05 m/m
Q _{sc} (capacidad de arrastre)	2,27x10 ⁻⁰⁴ m ³ /s
Q _s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	0,793 (Flujo subcrítico)
y _c (tirante crítico)	0,024m

En donde y, v, Q, \emptyset_{fondo} , son valores medidos en el canal de experimentos y η , F, y_c, Q_{sc}, son valores obtenidos de mediciones indirectas, a través de fórmulas matemáticas; Q_s fue estimado experimentalmente tomando la consideración que este fuese menor que Q_{sc} y en función de la cantidad de arena disponible para la realización del ensayo hasta que alcanzara el equilibrio.

La estimación de η para el fondo del canal se obtuvo de la relación matemática ponderada en función del radio hidráulico propuesto por Manning en 1889 en función de la profundidad normal y los η para el vidrio y madera son los propuestos por Manning igualmente.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: El caudal de sedimento vertido aguas arriba de la presa fue transportado por el flujo de agua en el canal sin sedimentarse en los primeros 3,3m aguas abajo donde la condición de régimen es uniforme; luego debido al efecto

generado por la presa aguas abajo del canal (remanso) dicho régimen es alterado, convirtiéndose en gradualmente variado lo que conllevó a que el sedimento se sedimentara en el fondo del canal (punto de formación del remanso). Debido a que el caudal sólido es suministrado de manera constante se produjo en el canal aguas abajo un avance del delta de sedimentos en el fondo del canal de forma aproximadamente constante en tiempo y espacio como se aprecia en la figura 26, cuyo frente presenta una inclinación aproximadamente constante hasta colmatar la presa en su totalidad. Cabe destacar que mientras el frente del delta avanza hacia adelante, también existe un avance de la sedimentación hacia aguas arriba; dicho fenómeno se da más rápidamente cuando el delta colmata la presa, hasta que el sistema entra en equilibrio. Este experimento tuvo una duración de 52 minutos con 30 segundos. Momento en el cual el canal se sedimentó hasta donde se encontraba la tolva (figura 27).

Q_{Sm} : Caudal sólido medido, tomado como un promedio del volumen sedimentado en el canal correspondiente al avance de la onda de sedimentación: $0,00257862 \text{ m}^3/\text{minuto}$ (figura 26).

q_{Sm} : *Caudal unitario de sedimentación:* Avance unitario del sedimento, tomado como un promedio del volumen sedimentado en el canal por unidad de ancho transversal: $0,0085954 \text{ m}^3/\text{minuto} \cdot \text{m}$.

Pendiente del frente del delta: La pendiente del frente del delta fue 35.75° con respecto a la horizontal.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de $4,08 \%$ (figura 26).

Variación del perfil de flujo. El perfil del agua evolucionó de una condición de flujo gradualmente variado en las condiciones iniciales generadas por la presa aguas abajo del canal, hasta una condición de flujo aproximadamente uniforme cuando ya la ausencia del obstáculo no permite la formación del remanso (figura 28).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 25), observándose, un aumento en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y que se profundiza en el perfil (como era de esperarse) para las muestras más cercanas al dique. Sin embargo aguas arriba (3.60 m) este comportamiento se invierte; ligeramente. La cercanía de los valores a los de la granulometría inicial, nos hace inferir, que ya a esta distancia la turbulencia no permite una estratificación de tamaños.

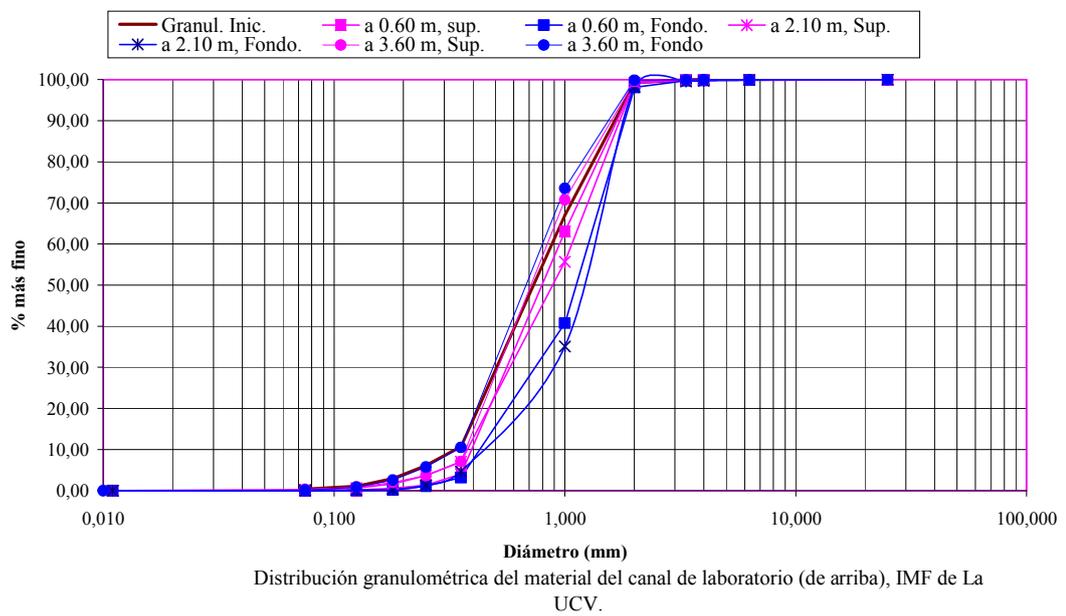


Figura 25. Análisis granulométrico realizado al ensayo 1. Todas las medidas con las que se hicieron las mediciones están tomadas de la presa hacia aguas arriba.

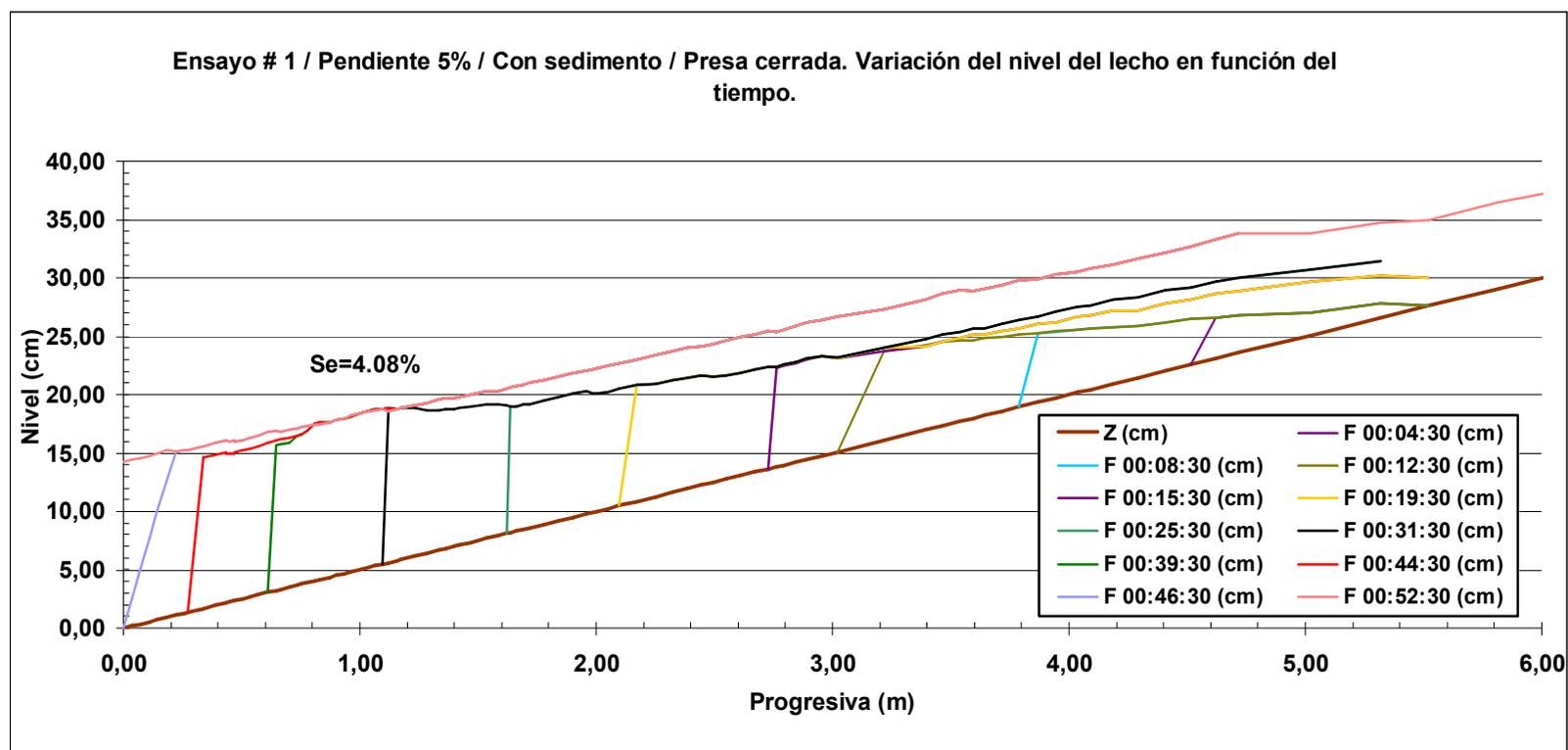


Figura 26. Variación espacial y temporal del perfil del delta observado en el ensayo 1, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (F00:04:30) y su avance en el tiempo hasta el perfil de equilibrio (F00:52:30).

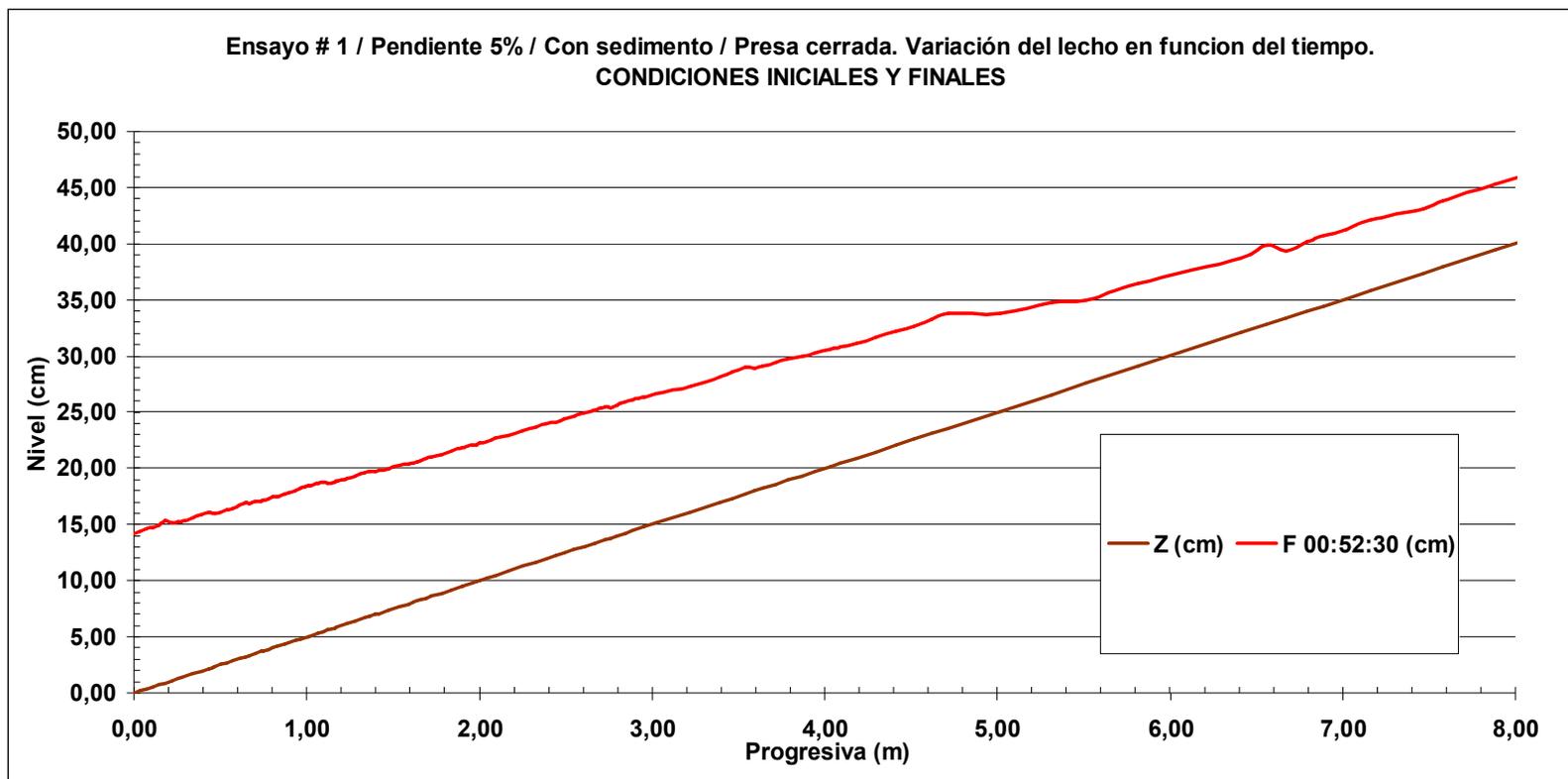


Figura 27. Variación del perfil del delta observado en el ensayo 1, donde se aprecia la condición inicial y final.

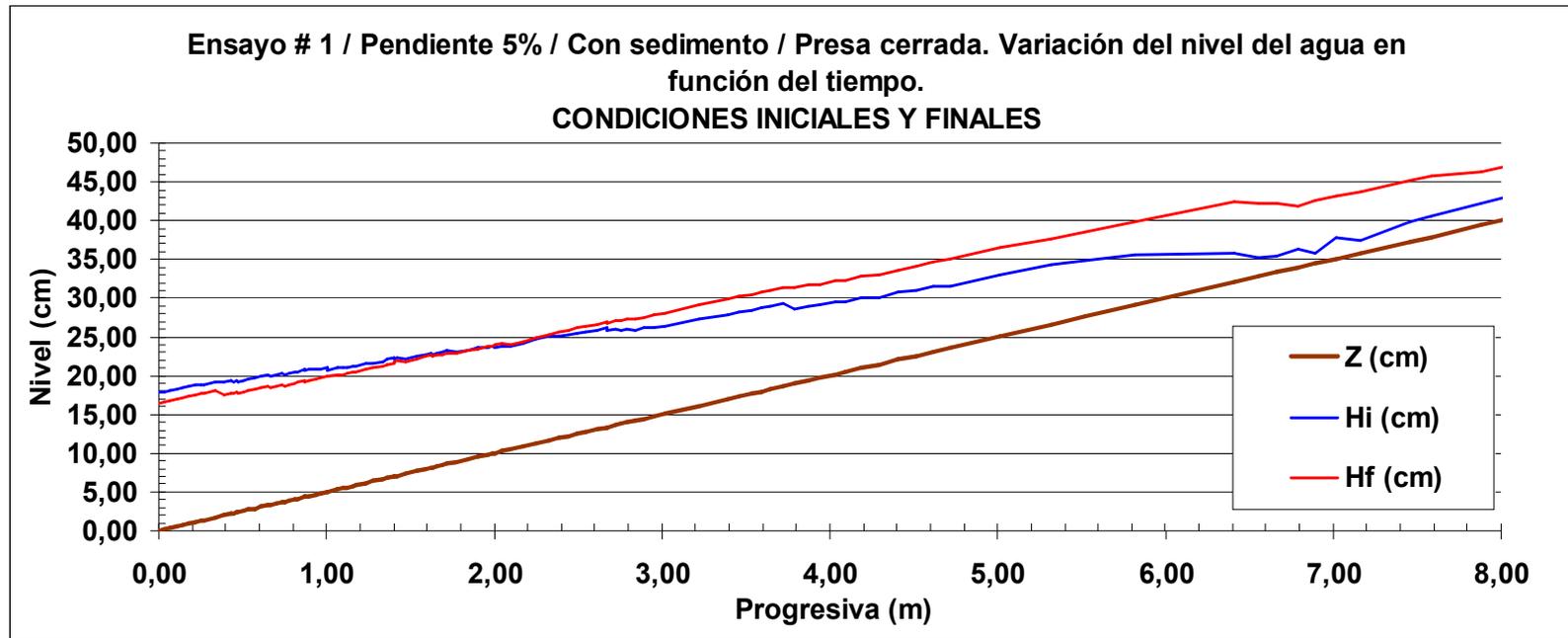


Figura 28. Variación del perfil de niveles del agua observados en el ensayo 1, donde se aprecia la condición inicial y final.

4.4.1.2. Ensayo 2: Cerrada sin vertedero. Aguas claras.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,027m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,049
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,4m/s
Q (caudal)	0,0031 m ³ /s
S (pendiente)	0,05 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	2,27x10 ⁻⁰⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	0,793 (Flujo subcritico)
y_c (tirante critico)	0,024m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo anterior.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Para este ensayo se dejó correr aguas claras sin caudal sólido sobre el lecho generado en el ensayo 1, observándose que el proceso de erosión se dio desde aguas arriba (8m) hasta 3 metros de la presa, (figura 31). A partir de esta distancia hacia aguas abajo la erosión fue casi nula o despreciable. Cabe descartar que se produjo una erosión o degradación gradual en el medio del lecho en el canal (figura 29). Al finalizar el ensayo (2 horas) el lecho resultante fue una cuña de sedimentos (figura 32) con forma de herradura sin presencia sedimentos en la parte del canal comprendido entre 3m y 8m aguas arriba (figura 30).

Q_{Sm} : 0,001824 m³/minuto (figura 31).

q_{Sm} : 0,0060 m³/minuto*m.

Variables anteriormente definidas.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 0.18 % (figura 31).

Variación del perfil de flujo: El perfil del agua varió gradualmente a medida que se iba degradando el delta en el intervalo de tiempo trascurrido del experimento, hasta que se alcanzó la pendiente de equilibrio que el flujo comenzó a socavar (erosionar) el lecho presente en el centro del canal y no el presente en las márgenes (figura 33).

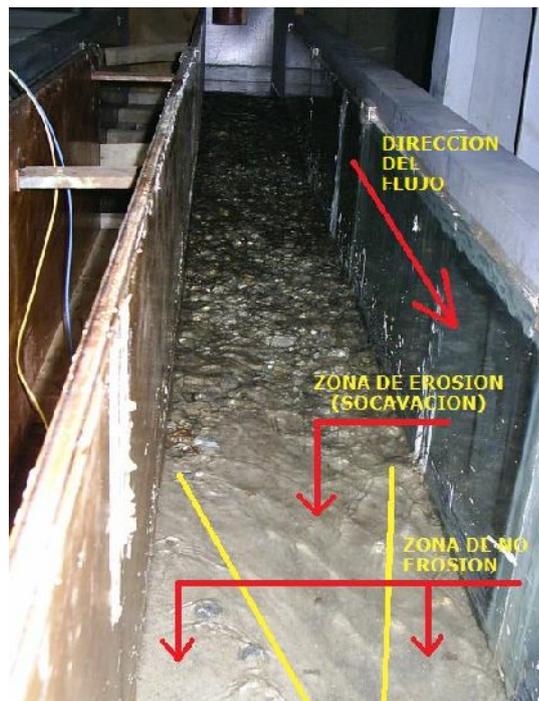


Figura 29. Foto donde se muestra el efecto de erosión en la parte central del canal y hacia las márgenes erosión nula. Forma de herradura.

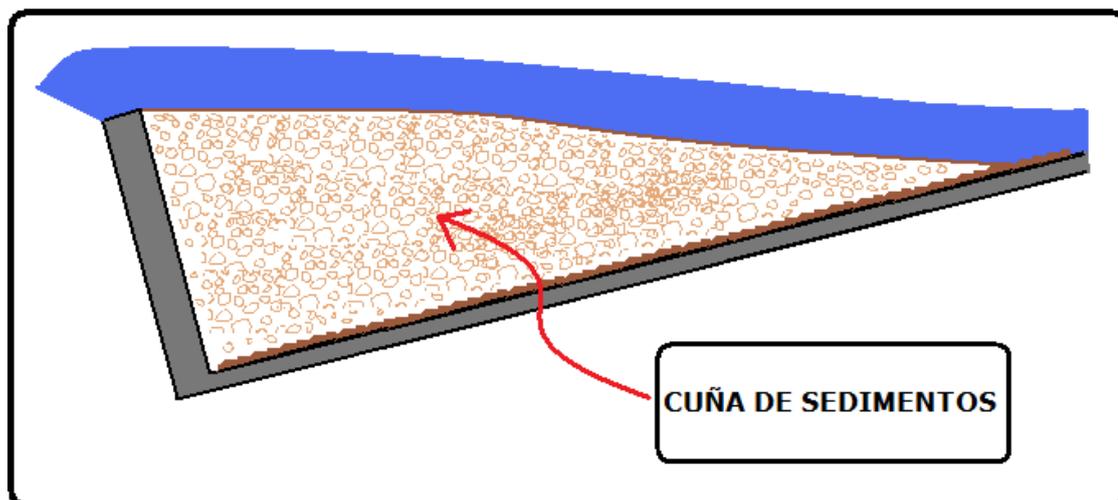


Figura 30. Imagen ilustrativa de la forma de cuña de fondo como resultado del momento en que se alcanzó el equilibrio en el canal.

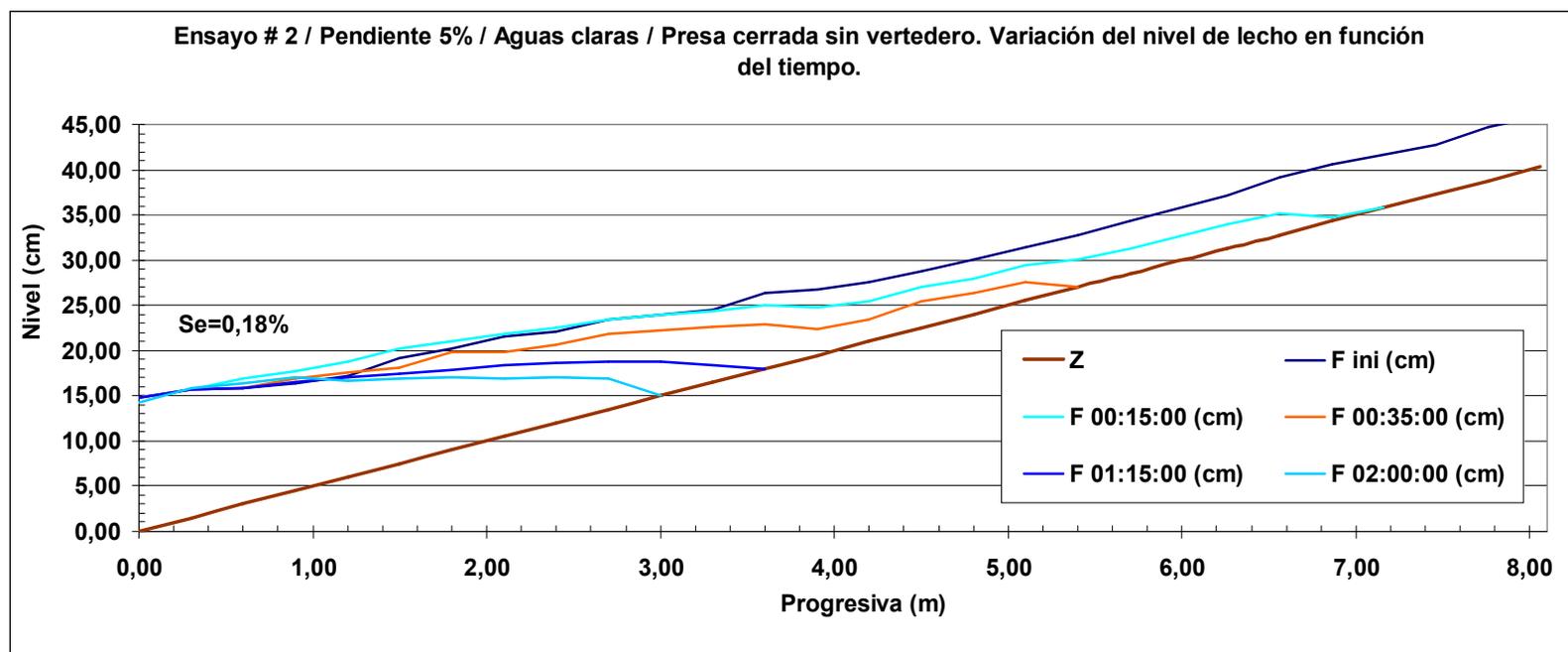


Figura 31. Variación espacial y temporal del perfil del delta observado en el ensayo 2, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (FONDO INICIAL) y su avance en el tiempo hasta el perfil de equilibrio (F20:00:00).

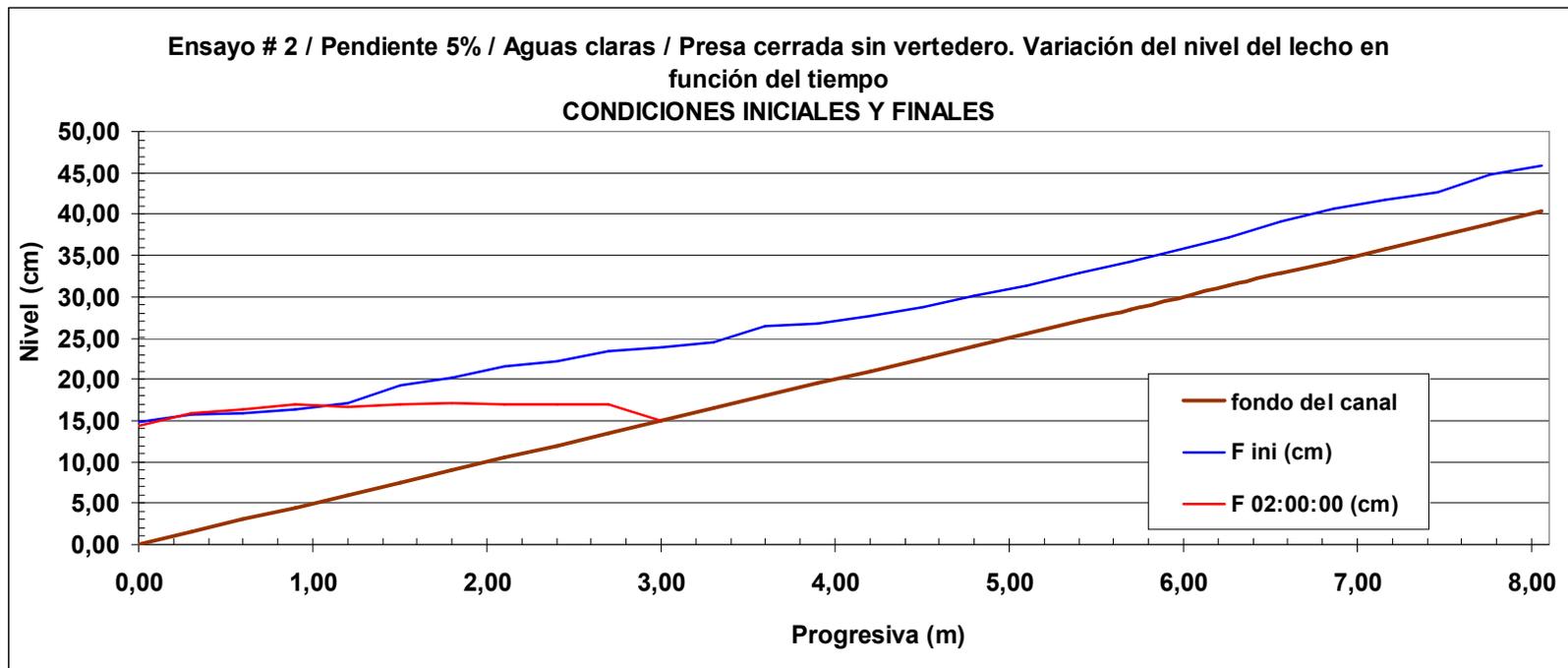


Figura 32. Perfiles inicial y final del nivel del delta referente al ensayo 2.

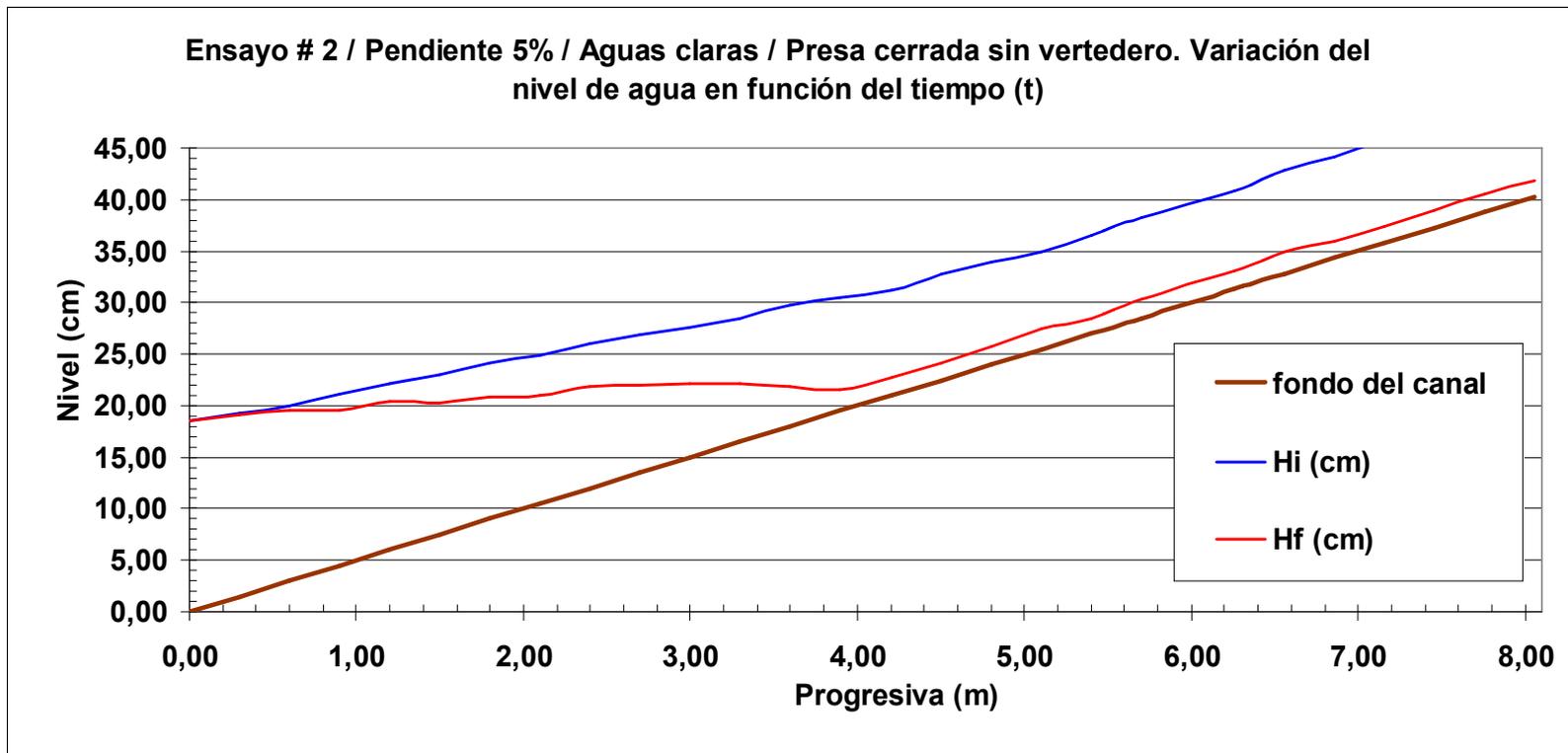


Figura 33. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 2, Se aprecia la variación del perfil de niveles de agua inicial y final.

4.4.1.3. Ensayo 3: Cerrada con vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,027m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,049
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,4m/s
Q (caudal)	0,0031 m ³ /s
S (pendiente)	0,05 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	2,27x10 ⁻⁰⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	0,793 (Flujo subcrítico)
y_c (tirante crítico)	0,024m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema en este ensayo son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 1. Con los aspectos resaltantes descritos a continuación:

En esta experiencia se observó un fenómeno particular: En los extremos cercanos a la presa se generaron unos vórtices y turbulencias que no permitieron la colmatación total de la presa, observándose un proceso de socavación continuo en esas zonas que mantuvieron los taludes del lecho sedimentado con una pendiente constante (figuras 36a y 36b).

Este experimento tuvo una duración de más de 38 minutos (siendo este preciso tiempo, en el cual no varió más la capa de sedimentos en el fondo) (figura 37).

Q_{Sm} : 0,00222859 m³/minuto. Figura 35.

Q_{Sm} : 0,00742865 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 3.97 % (figura 35).

Pendiente del frente del delta: La pendiente del frente del delta fue 35.58° con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo: El perfil del agua evolucionó de una condición de gradualmente variado en las condiciones iniciales generadas por la presa aguas abajo del canal (remanso), hasta flujo uniforme; sin embargo en las proximidades de la presa por efectos del vertedero se presenta régimen gradualmente variado (figura 38).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y en la columna vertical (figura 34), observándose, un aumento en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y que se profundiza en el perfil, Sin embargo aguas arriba (2.50m) este comportamiento se invierte lo que permite inferir que ya a esta distancia, la turbulencia no permite una estratificación de tamaños como ocurre aguas abajo.

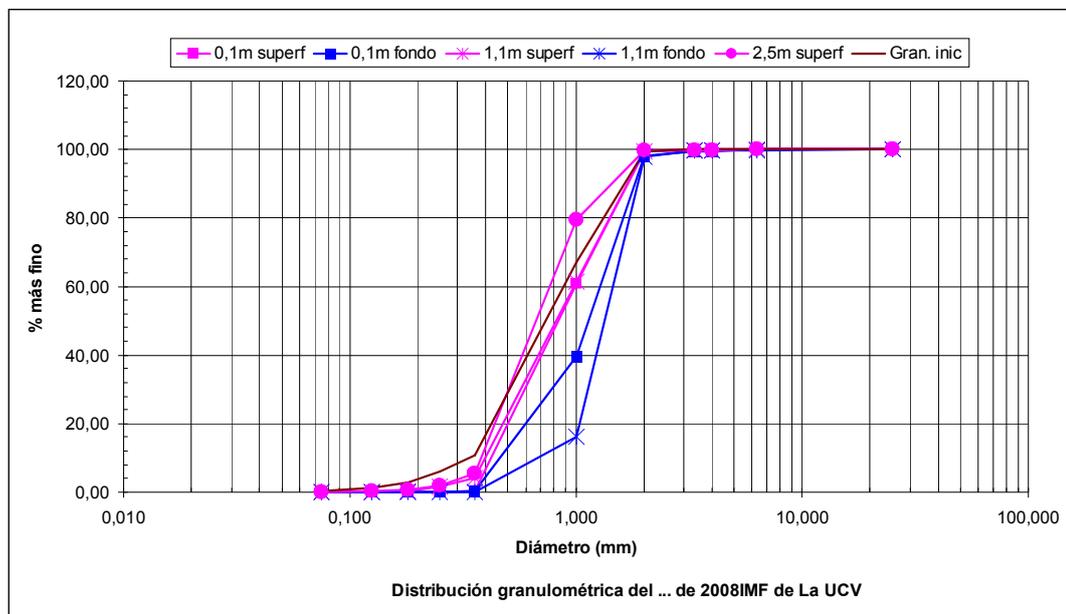


Figura 34. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 3.

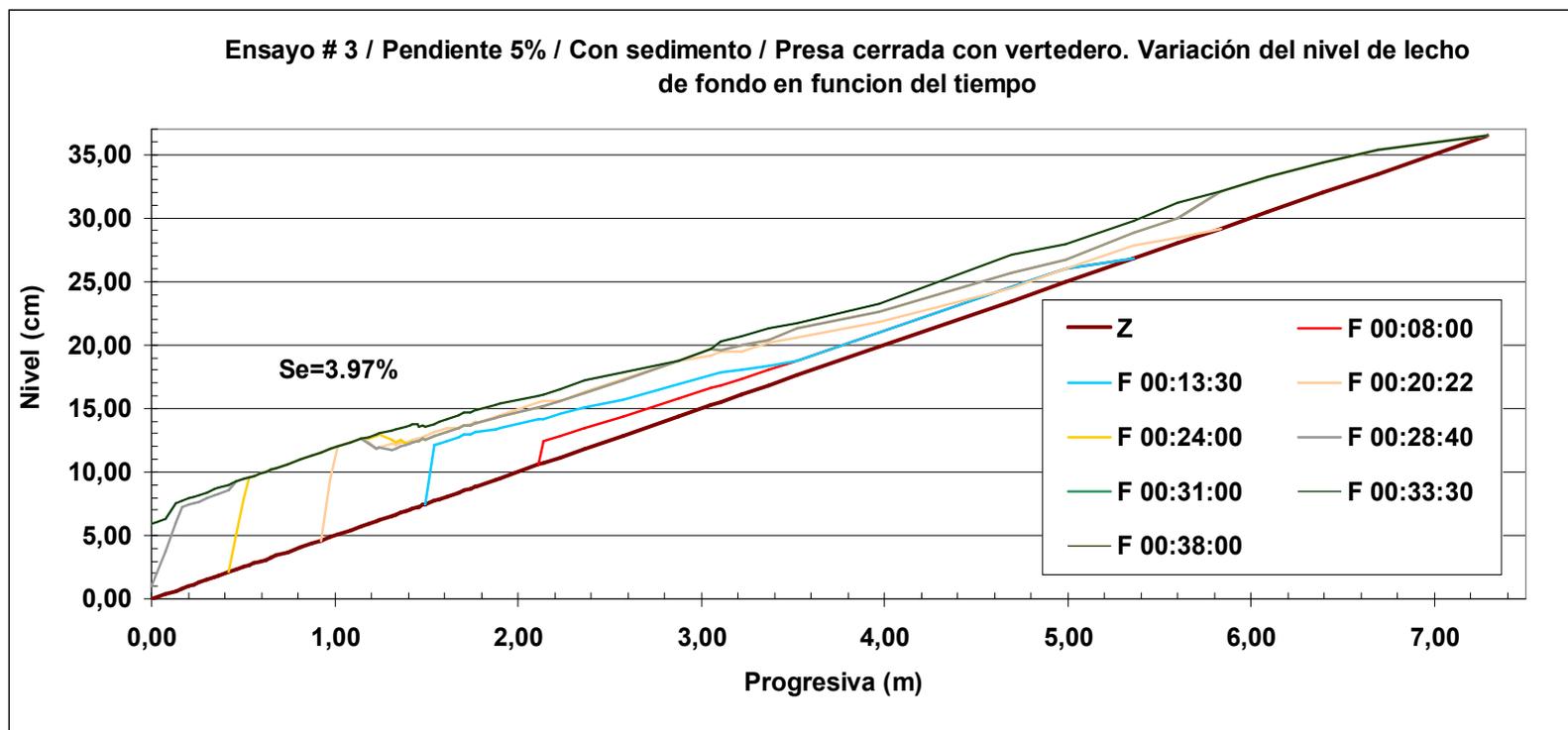


Figura 35. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 3, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (F00:08:00) y su avance hasta el perfil de equilibrio (F00:38:00).

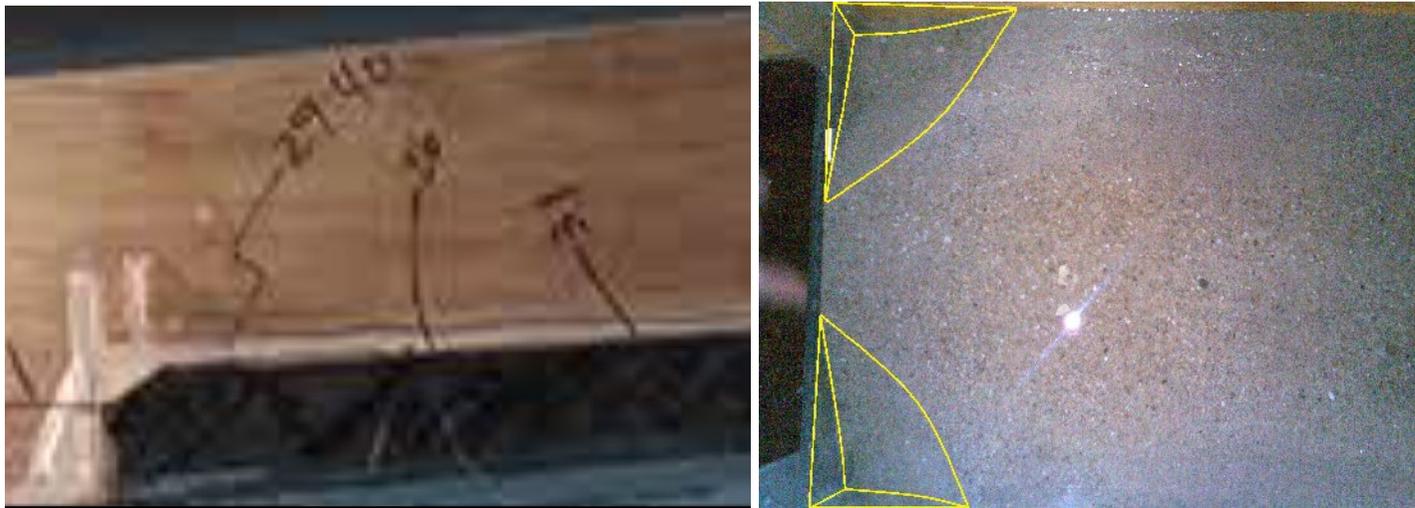


Figura 36a (izquierda). Imagen del ensayo donde se muestra el efecto generado por los vórtices en los laterales del vertedero en la presa; lo cual genera en el frente del perfil una pendiente constante debido a la socavación del lecho en las cercanías de la presa.

Figura 36b (derecha). Vista de planta del efecto generado por los vórtices presentes en los laterales de la presa con vertedero sobre el lecho. Socavación permanente.

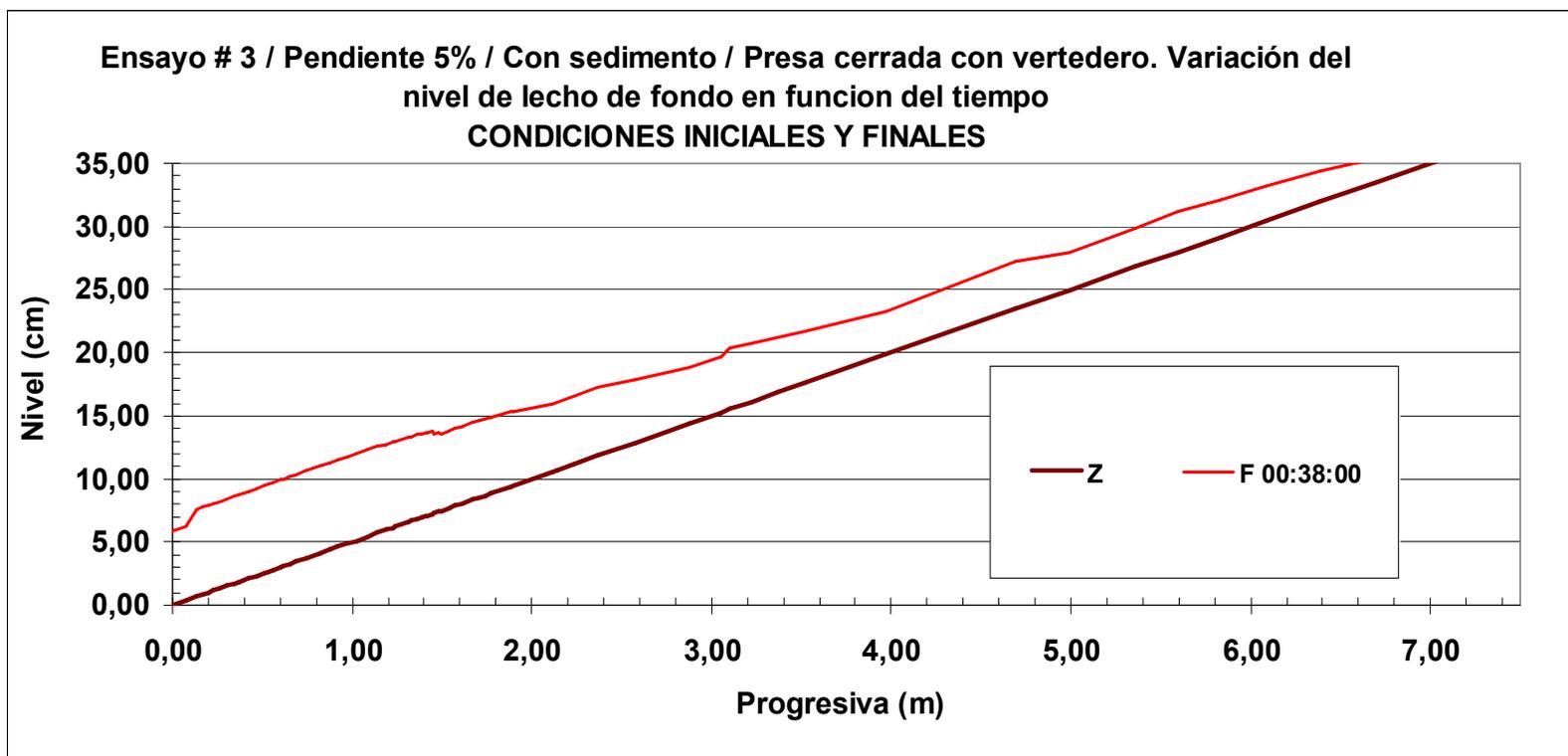


Figura 37. Perfiles inicial y final del nivel del delta referente al ensayo 3.

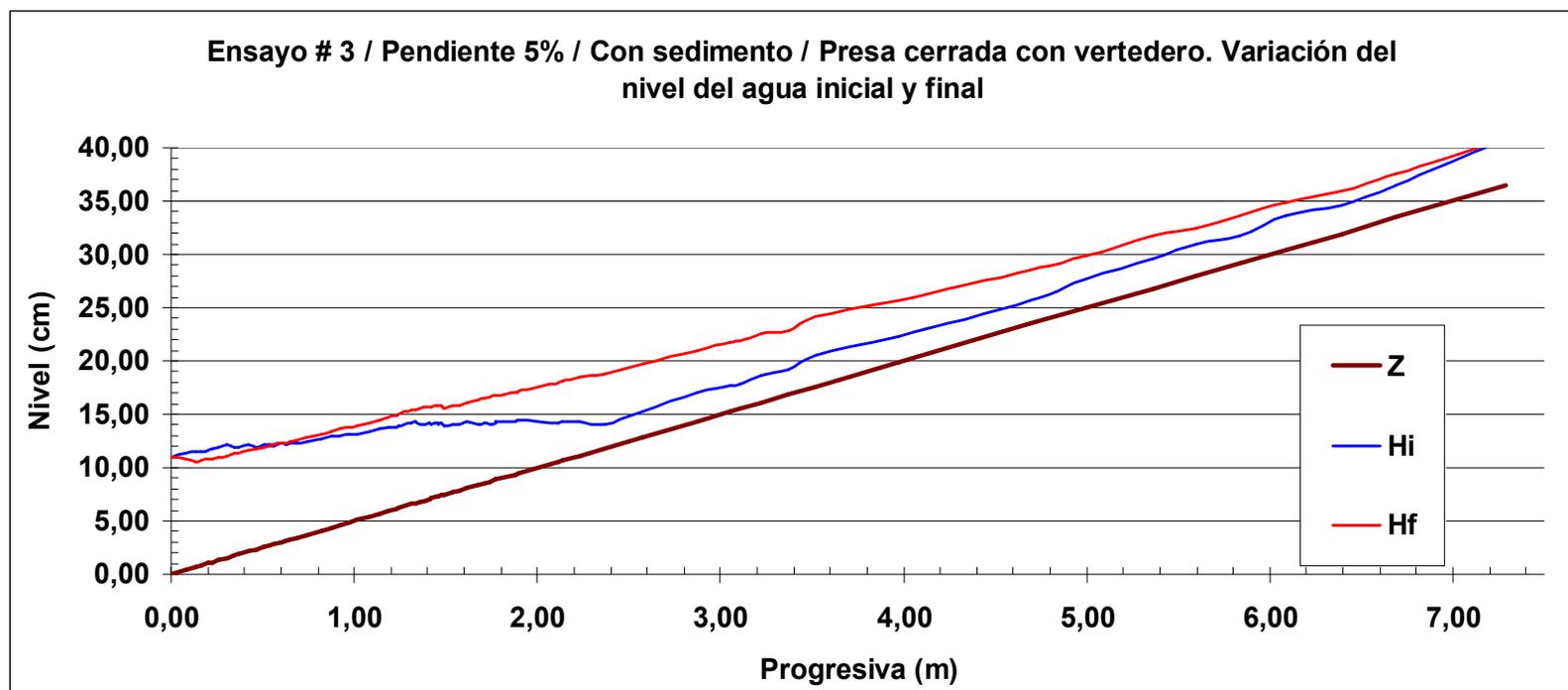


Figura 38. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 3.

4.4.1.4. Ensayo 4: Cerrada con vertedero. Aguas claras.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,027m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,049
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,4m/s
Q (caudal)	0,0031 m ³ /s
S (pendiente)	0,05 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	2,27x10 ⁻⁰⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	0,793 (Flujo subcritico)
y_c (tirante critico)	0,024m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares a los obtenidos anteriormente en el ensayo 2 (figura 39), con la diferencia que en esta experiencia se observó en las cercanías de la presa por efecto de los vórtices y turbulencias del flujo la no colmatación completa de la presa (similar al ensayo 3) (figura 33b).

Este experimento tuvo una duración de más de 40 minutos, siendo este preciso tiempo, en el cual no varió más el delta anteriormente formado (figura 40).

Q_{Sm} : 0,002197 m³/minuto (figura 40).

Q_{Sm} : 0,007323 m³/minuto*m.

Las variables han sido definidas anteriormente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 0,23% (figura 39).

Variación del perfil de flujo: El perfil del agua evolucionó similarmente al ensayo 2 hasta que se alcanzó la pendiente de equilibrio, con la diferencia que el comportamiento en las cercanías de la presa se comportó similar al ensayo anterior (ensayo 3) (figura 41).

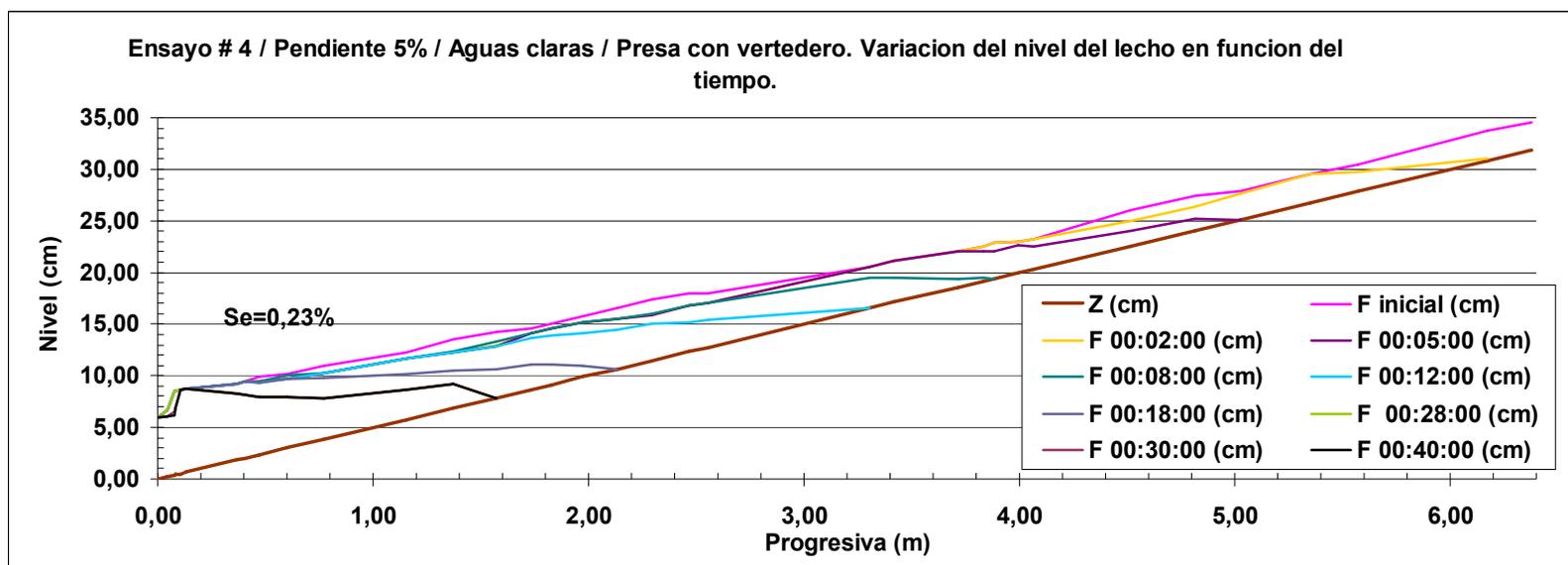


Figura 39. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 4, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (F00:02:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (F00:24:00).

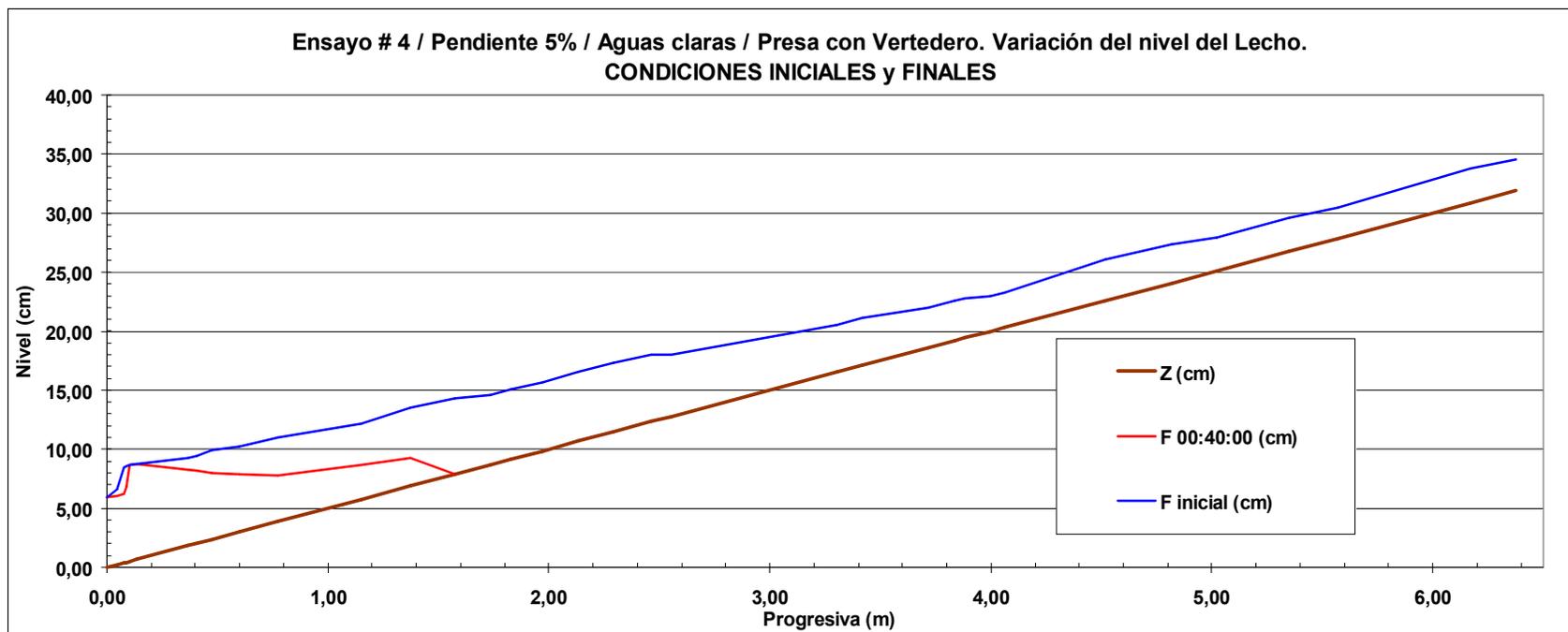


Figura 40. Perfiles inicial y final del nivel del delta referente al ensayo

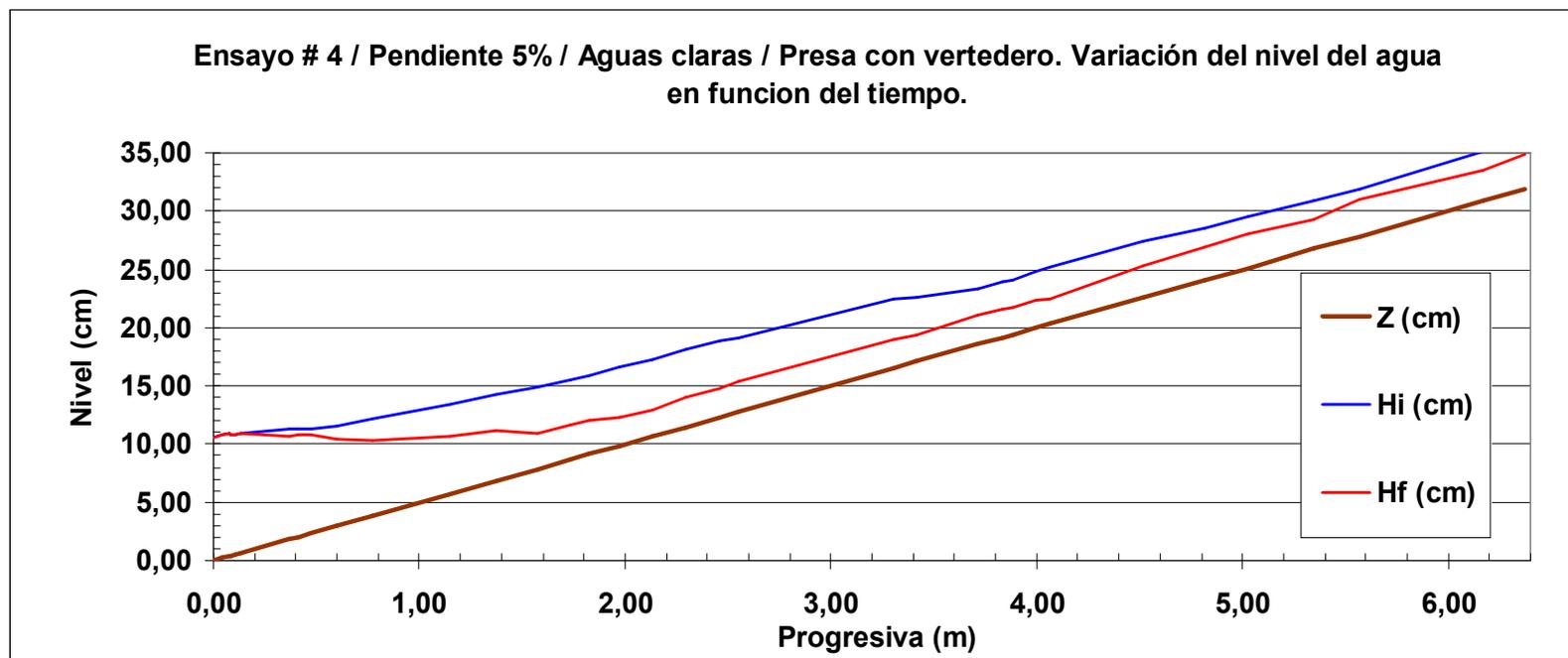


Figura 41. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 4.

4.4.2. Pendiente 7,5%

4.4.2.1. Ensayo 5: Cerrada sin vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,018m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,034
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,5 m/s
Q (caudal)	0,0029 m ³ /s
S (pendiente)	0.075 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	3,51x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,28 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante crítico)	0,021m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares a los obtenidos anteriormente en el ensayo 1 (figura 43).

Tomando en cuenta que la estabilización de la pendiente se obtuvo a los 22 minutos con 30 segundos, siendo el tiempo total de este experimento fue de 23 minutos con 4 segundos (figura 44).

Q_{Sm} : 0,002699 m³/minuto (figura 43).

Q_{Sm} : 0,008998 m³/minuto*m.

Las variables han sido definidas anteriormente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 3,33 % (figura 43).

Pendiente del frente de onda de sedimentación: La pendiente del frente del delta fue 26.60° con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo: El comportamiento de esta variable fue similar al ensayo 1 anteriormente descrito (figura 45).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 42), observándose, una disminución en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y a medida que se profundiza un aumento del tamaño del grano. Este comportamiento es uniforme en todo el canal permite inferir que es por causa del resalto hidráulico presente.

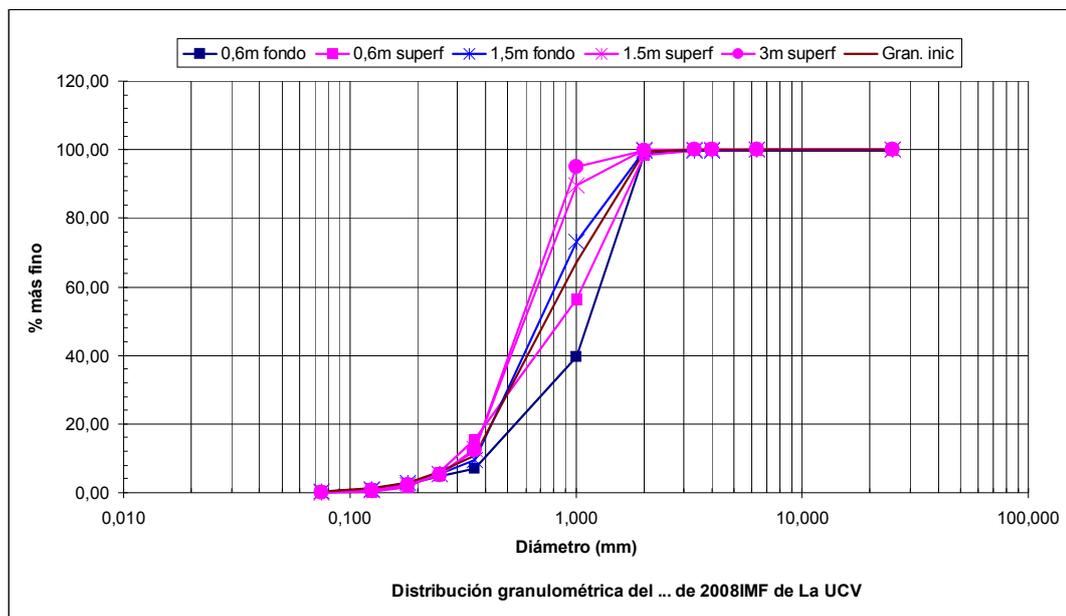


Figura 42. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada aguas arriba para el ensayo 5.

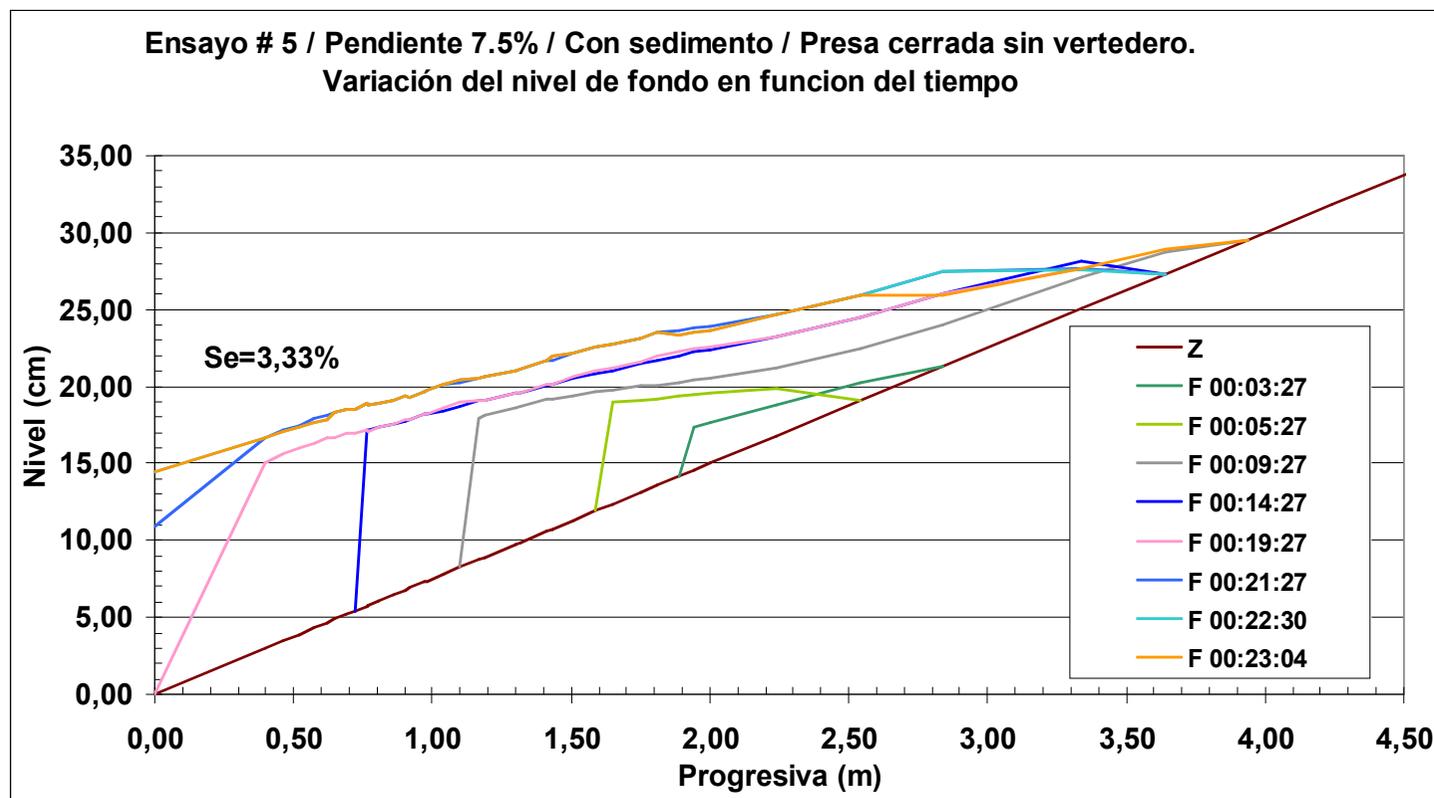


Figura 43. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 5, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (F00:03:27) y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio (F00:23:04).

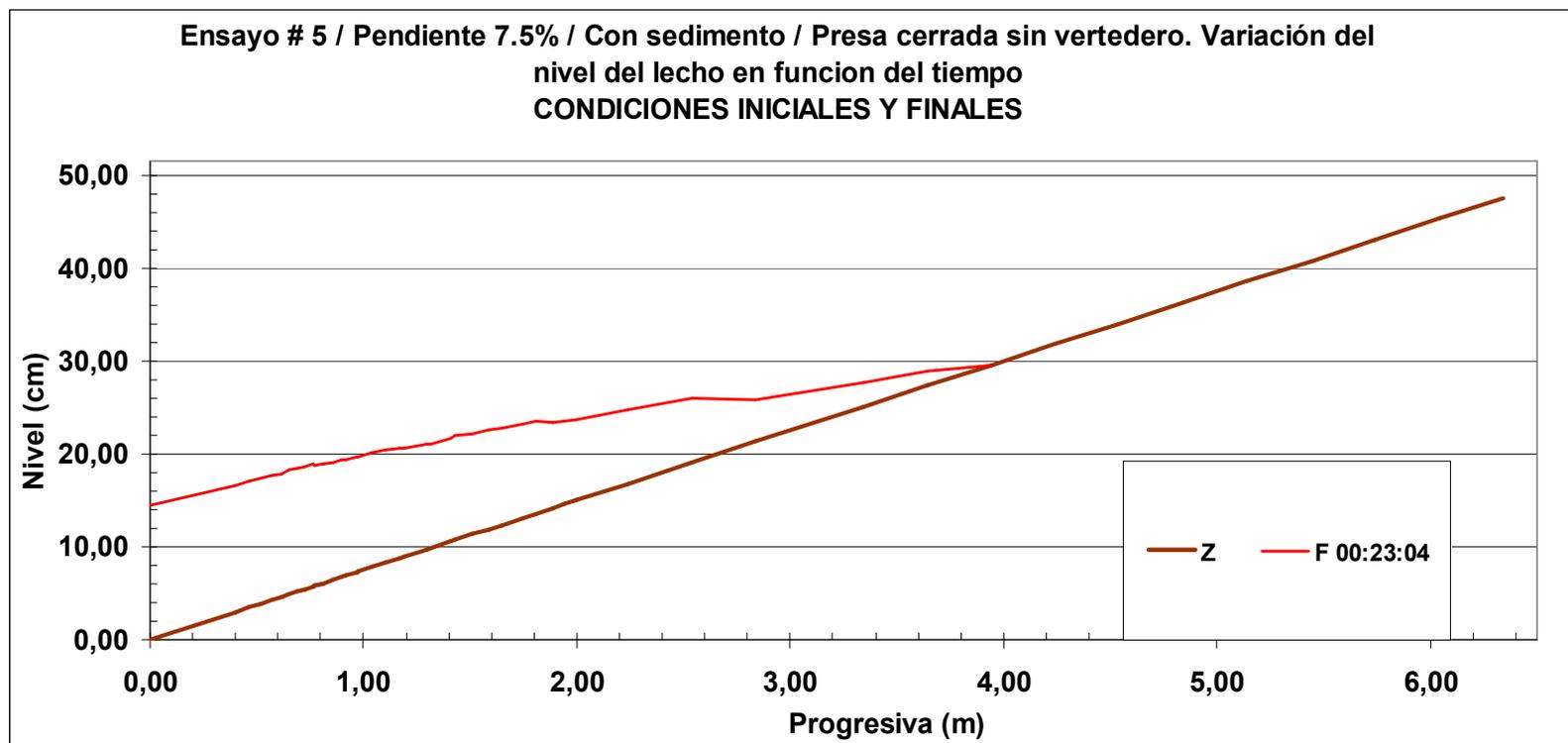


Figura 44. Perfiles de los niveles del lecho referentes al ensayo 5.

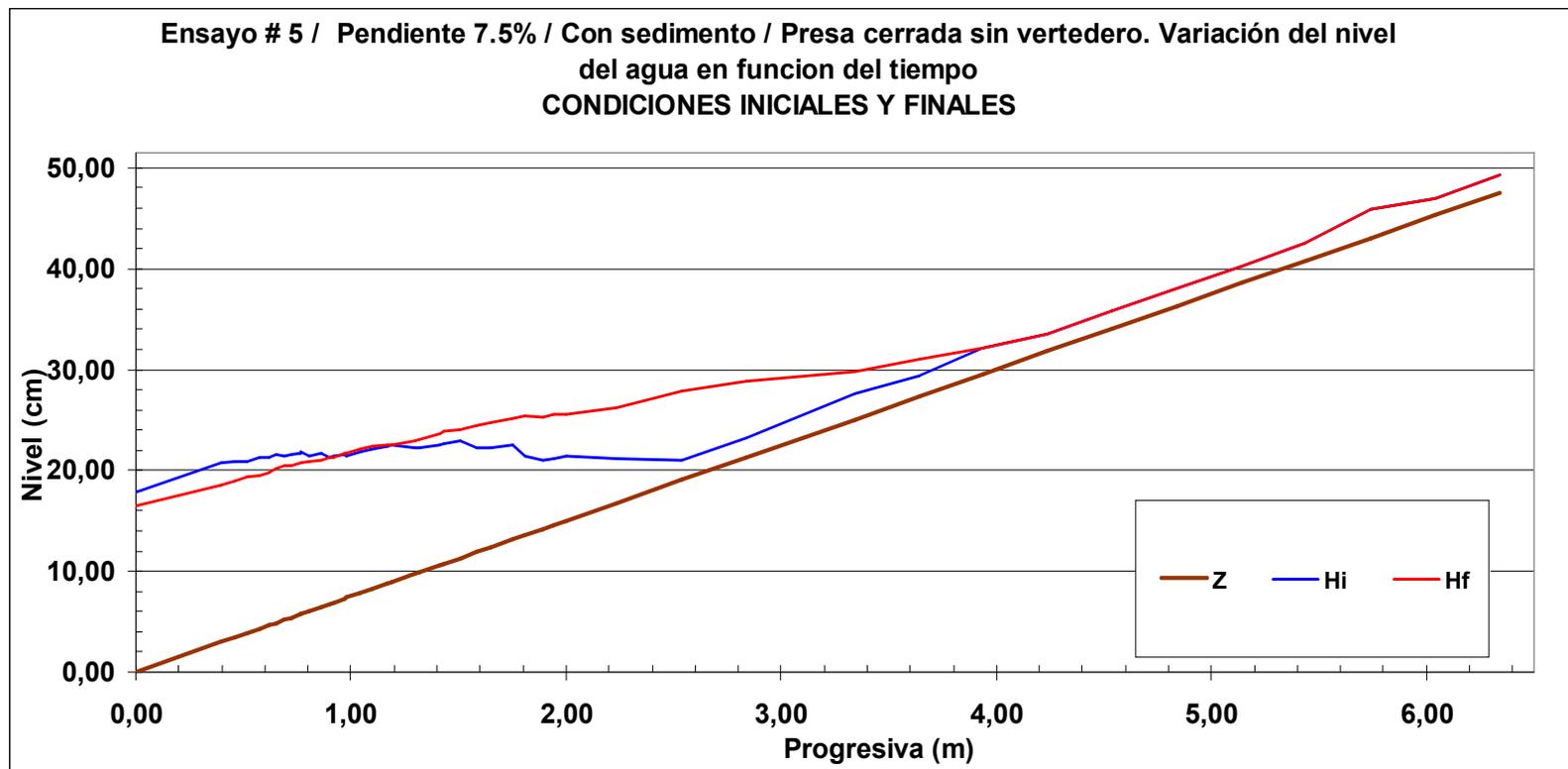


Figura 45. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 5, Se aprecia la variación del perfil de agua inicial y final.

4.4.2.2. Ensayo 6: Cerrada sin vertedero. Aguas claras.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,018m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,034
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,5 m/s
Q (caudal)	0,0029 m ³ /s
S (pendiente)	0.075 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	3,51x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,28 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante critico)	0,021m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares a los obtenidos anteriormente en el ensayo 2.

Tomando en cuenta que la degradación del lecho se dio en el canal entre los aproximadamente 2 m y 4.6 metros aguas arriba de la presa (figura 46) en un tiempo de 40 minutos, aunque cabe destacar que a partir de 28 minutos ya se tenía la pendiente de equilibrio aproximada (figura 47).

Q_{Sm} : 0,002845 m³/minuto. Figura 46.

Q_{Sm} : 0,009485 m³/minuto*m.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de -0.10 % (figura 46).

Variación del perfil de flujo: El comportamiento de esta variable fue similar al ensayo 2 anteriormente descrito (figura 48).

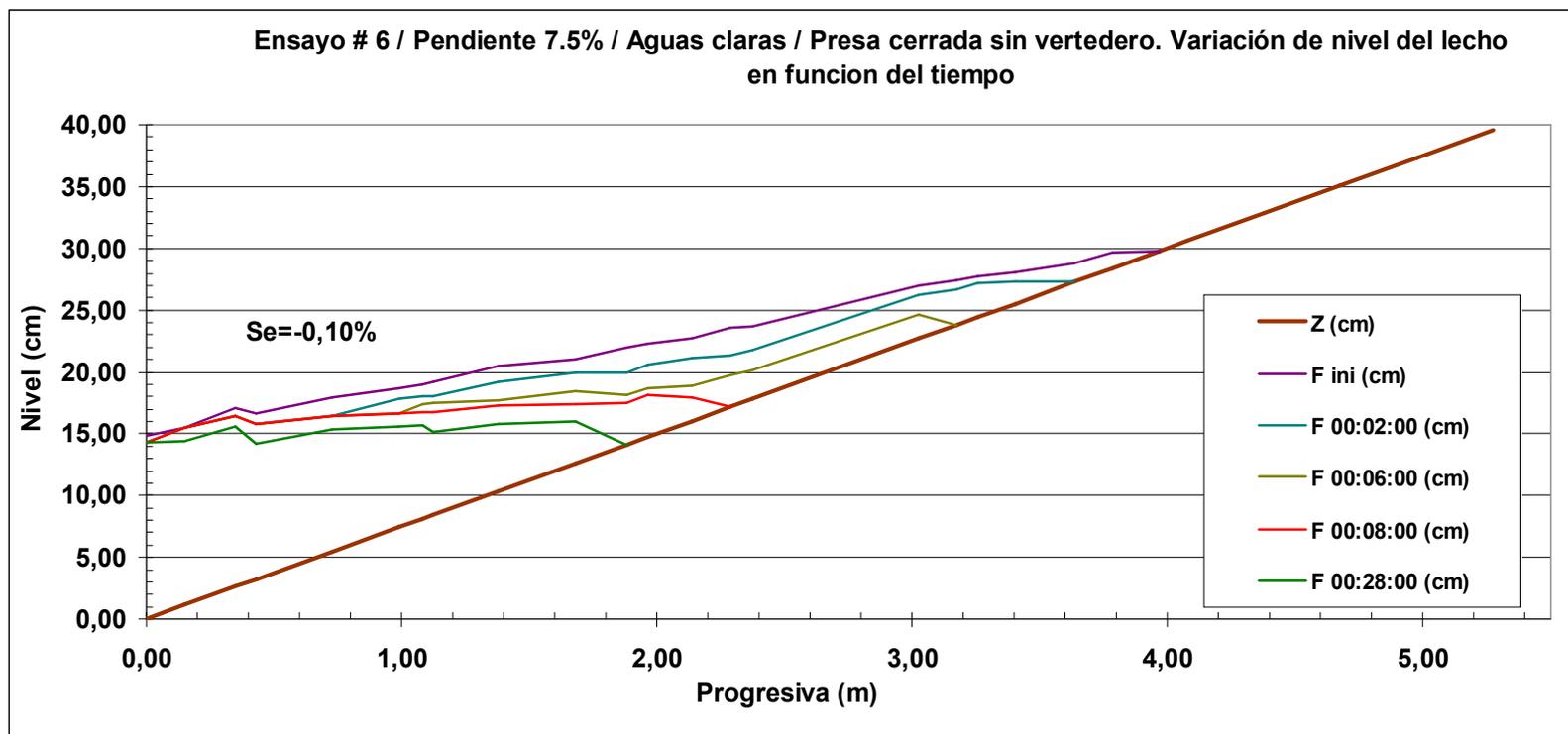


Figura 46. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 6, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (F00:02:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (F40:00:00).

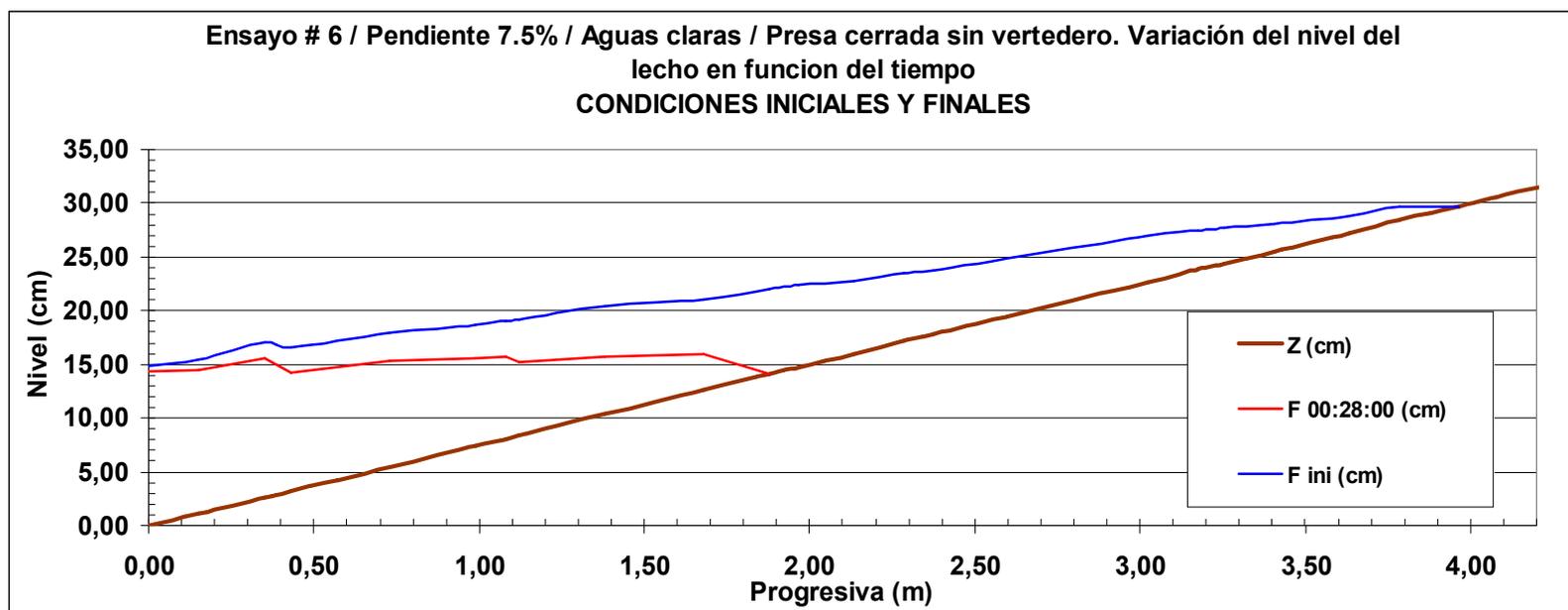


Figura 47. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 6.

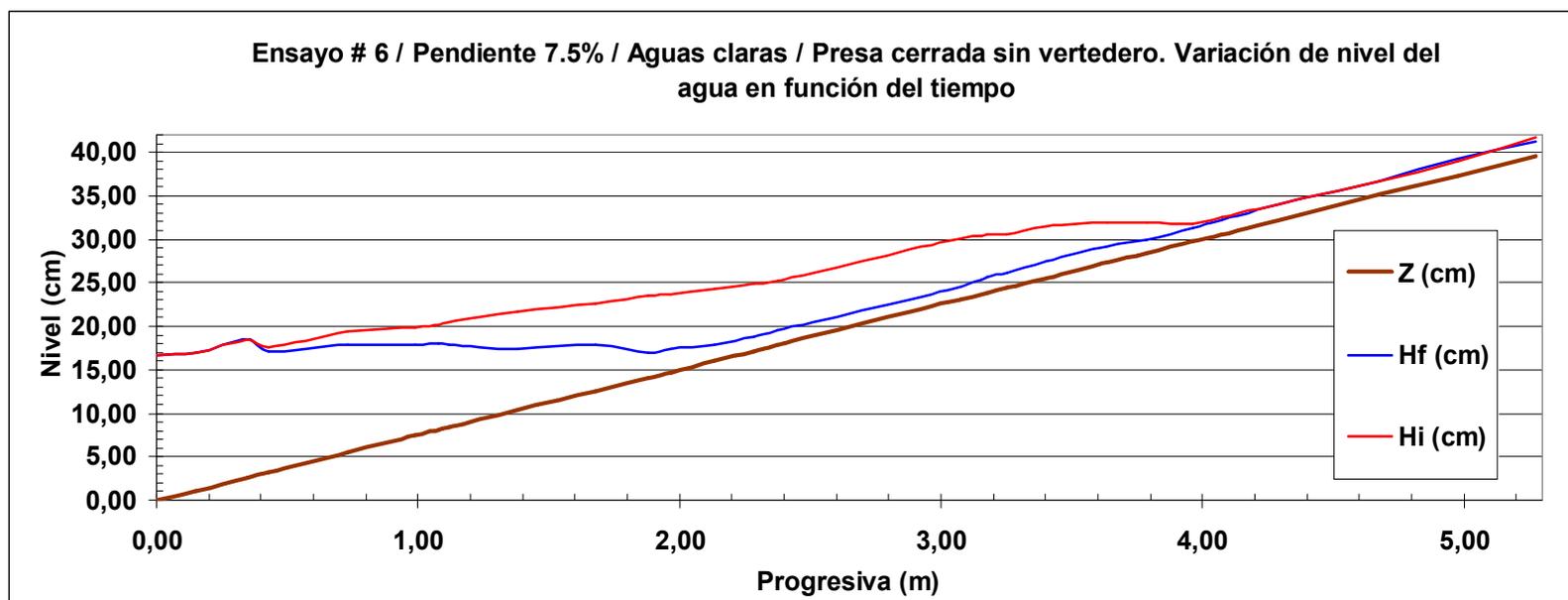


Figura 48. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 6, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.4.2.3. Ensayo 7: Cerrada con vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,018m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,034
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,5 m/s
Q (caudal)	0,0029 m ³ /s
S (pendiente)	0.075 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	3,51x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,28 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante critico)	0,021m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 3 (figura 49).

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración de 20 minutos con 24 segundos (siendo este preciso tiempo, en el cual no varió más la capa de sedimentos en el fondo) (figura 50).

Q_{Sm} : 0,002897 m³/minuto (figura 49).

Q_{Sm} : 0,009656 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 4.89 % (figura 49).

Pendiente del frente de onda de sedimentación: La pendiente del frente del delta fue 36.17° con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo: perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 3 (figura 51).

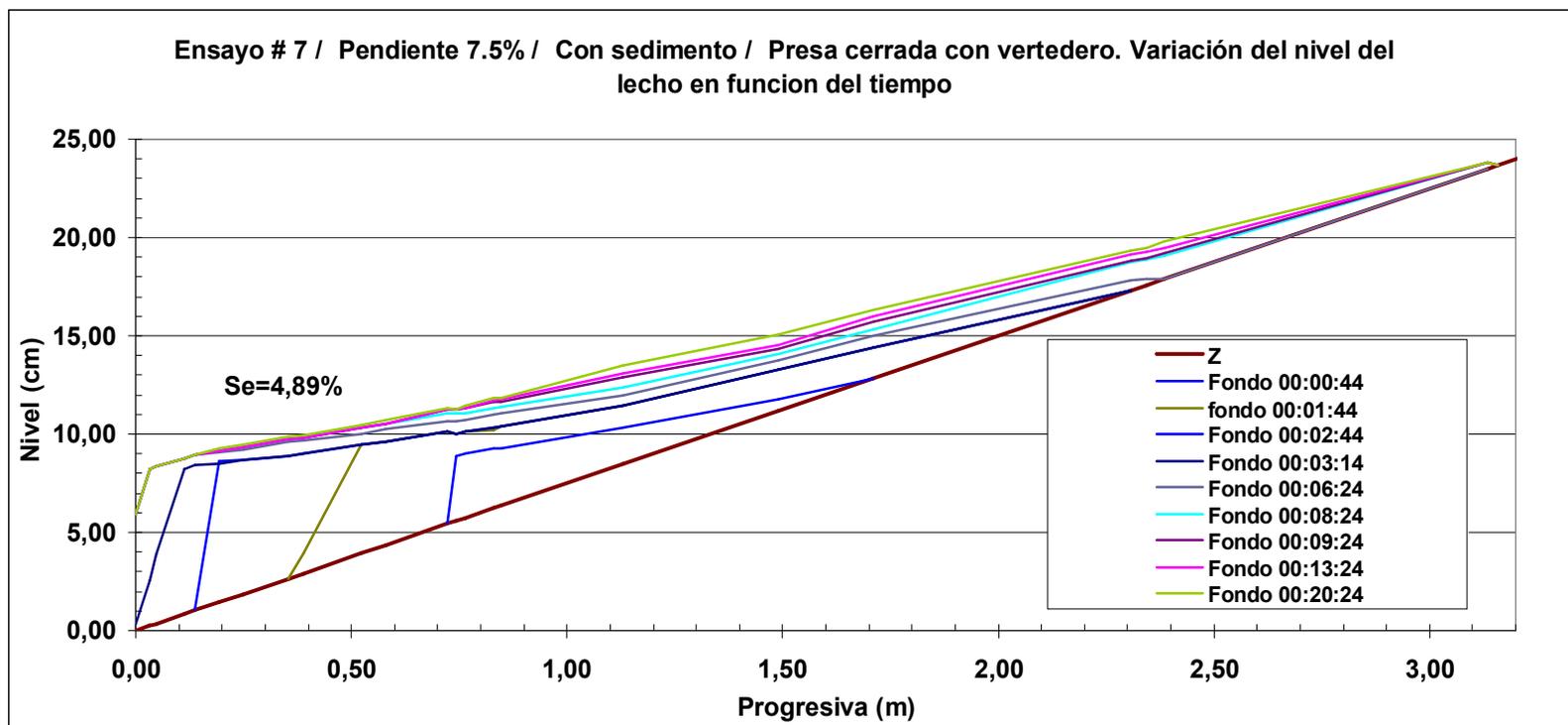


Figura 49. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 7, donde se aprecia la formación desde el primer perfil y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio.

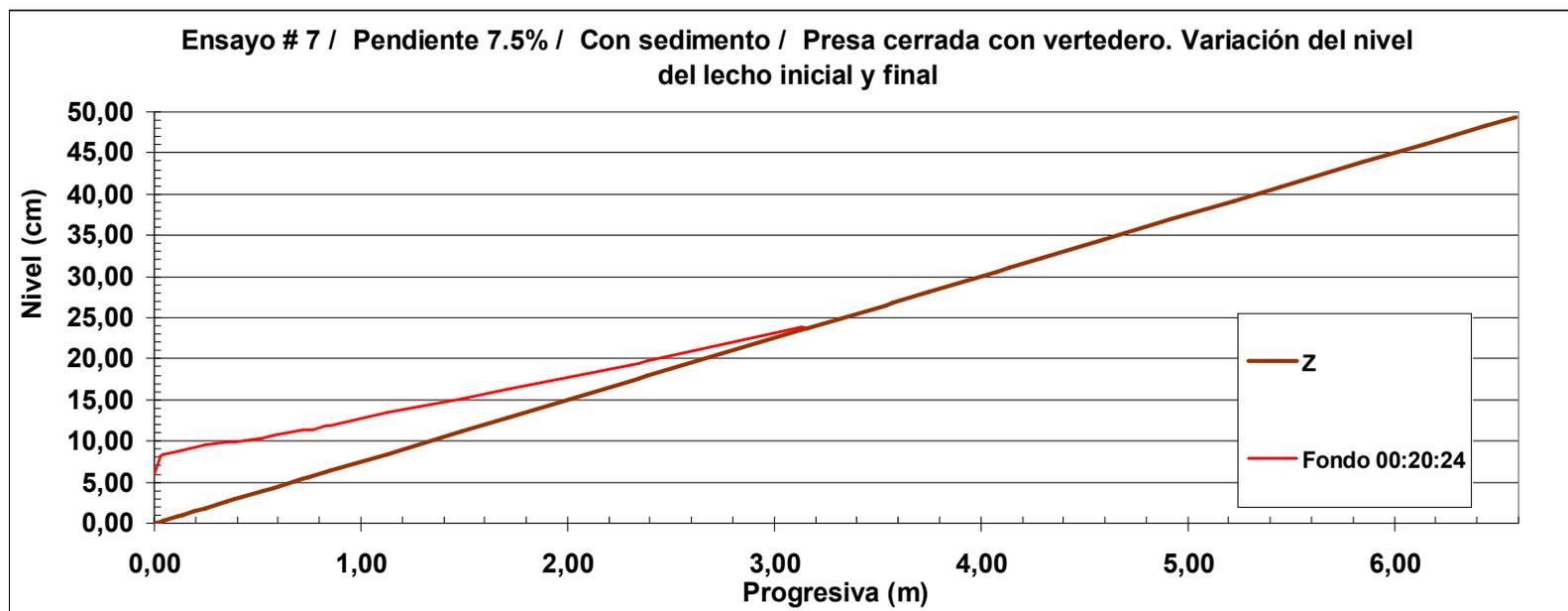


Figura 50. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 7.

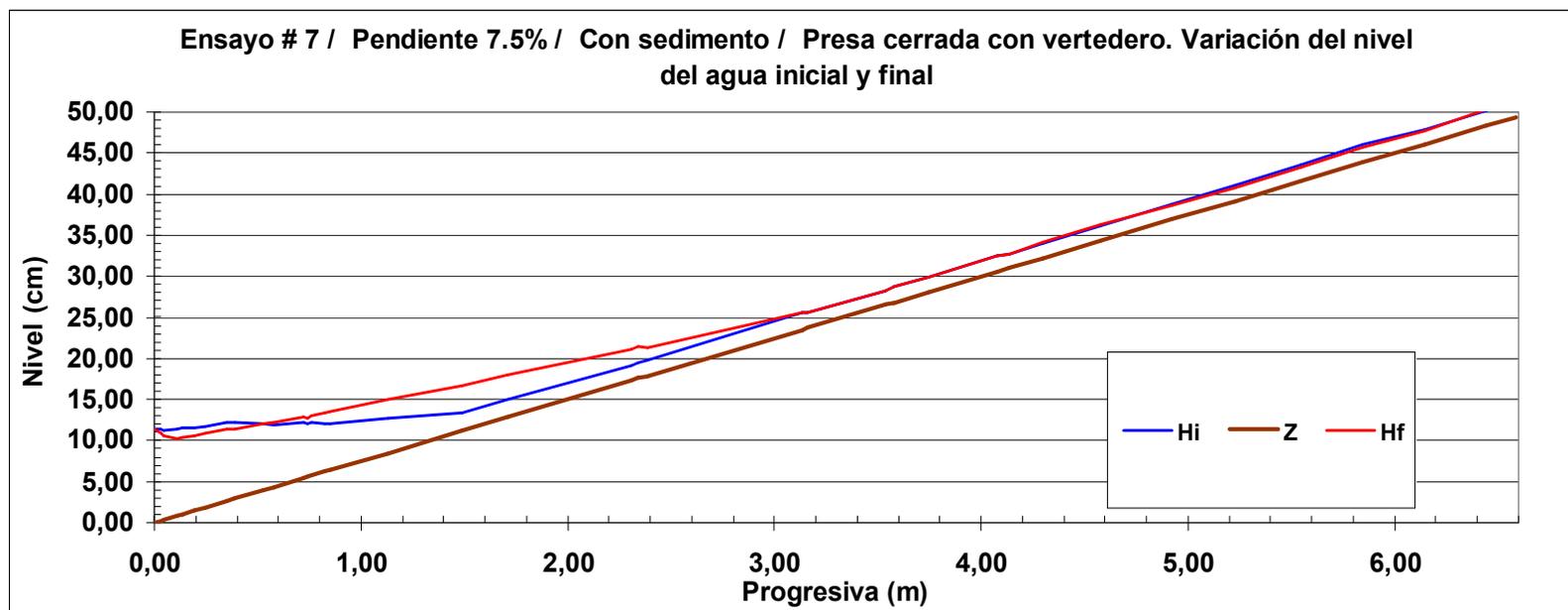


Figura 51. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 7.

4.4.2.4. Ensayo 8: Cerrada con vertedero. Aguas claras.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,018m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,034
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,5 m/s
Q (caudal)	0,0029 m ³ /s
S (pendiente)	0.075 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	3,51x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,28 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante critico)	0,021m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 4.

Este experimento tuvo una duración de 13 minutos; obteniendo la pendiente de equilibrio aproximadamente a los 8 minutos (siendo este preciso tiempo en el cual no varió significativamente la capa de sedimentos en el fondo) (figura 53).

Q_{Sm} : 0,002202 m³/minuto (figura 52).

Q_{Sm} : 0,007342 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 0.811 % (figura 52).

Variación del perfil de flujo. El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 4 (figura 54).

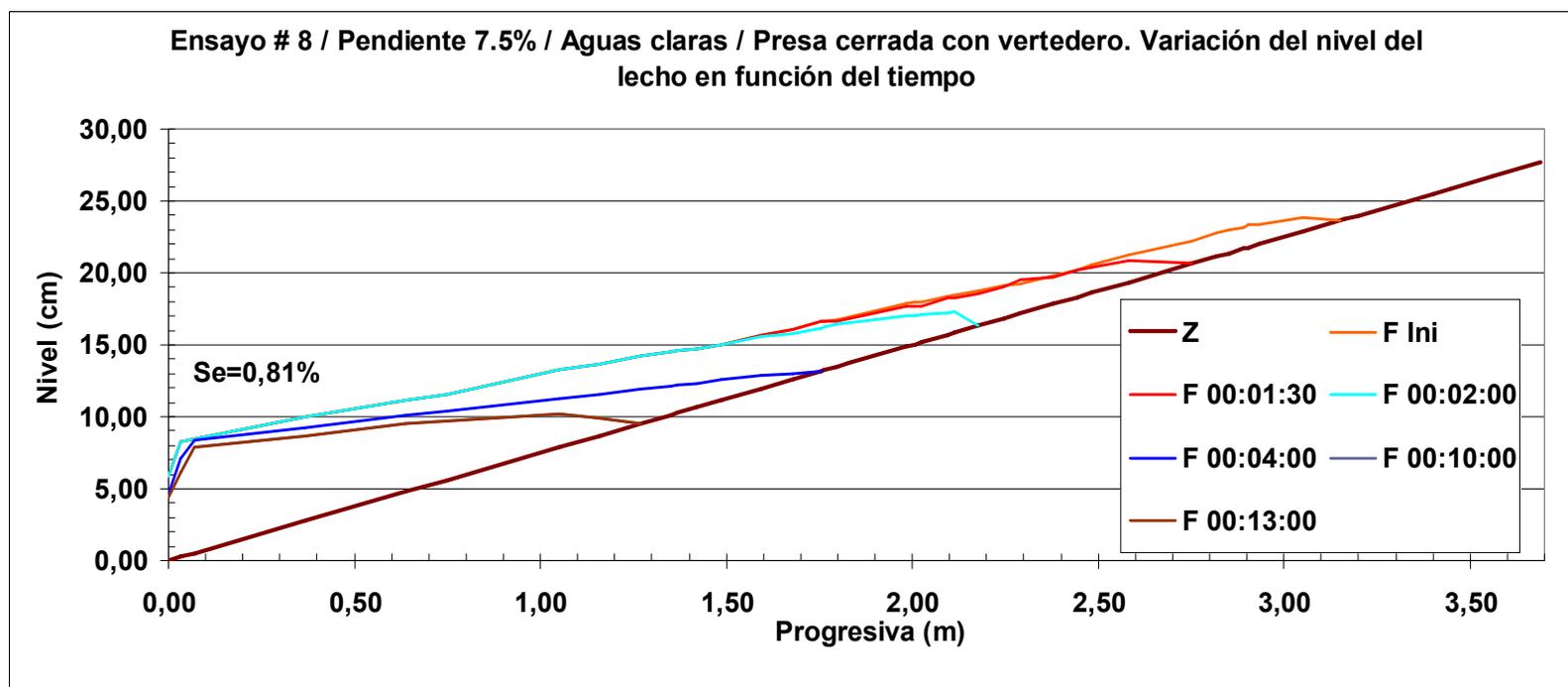


Figura 52. Variación espacial y temporal del perfil del lecho en el ensayo 8, donde se aprecia el efecto gradual de la degradación del lecho del canal desde el momento de inicio (F00:01:30) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio

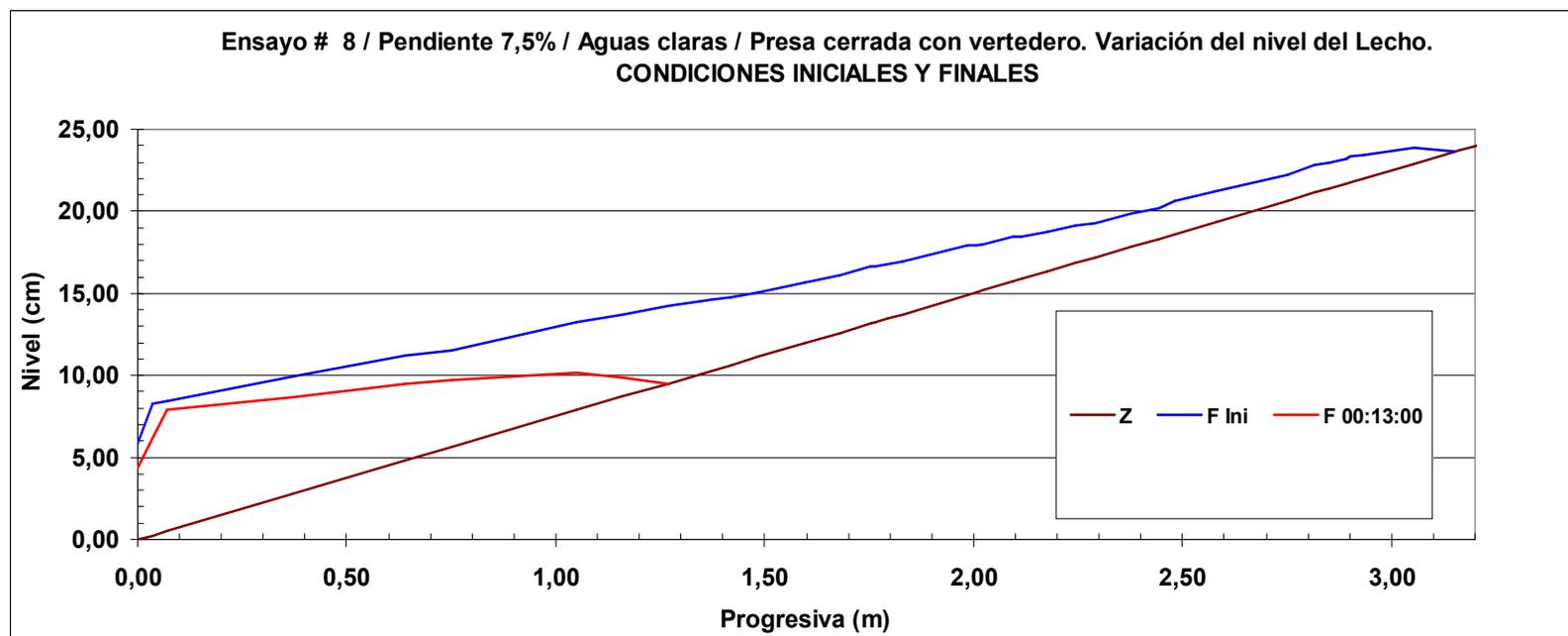


Figura 53. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 8.

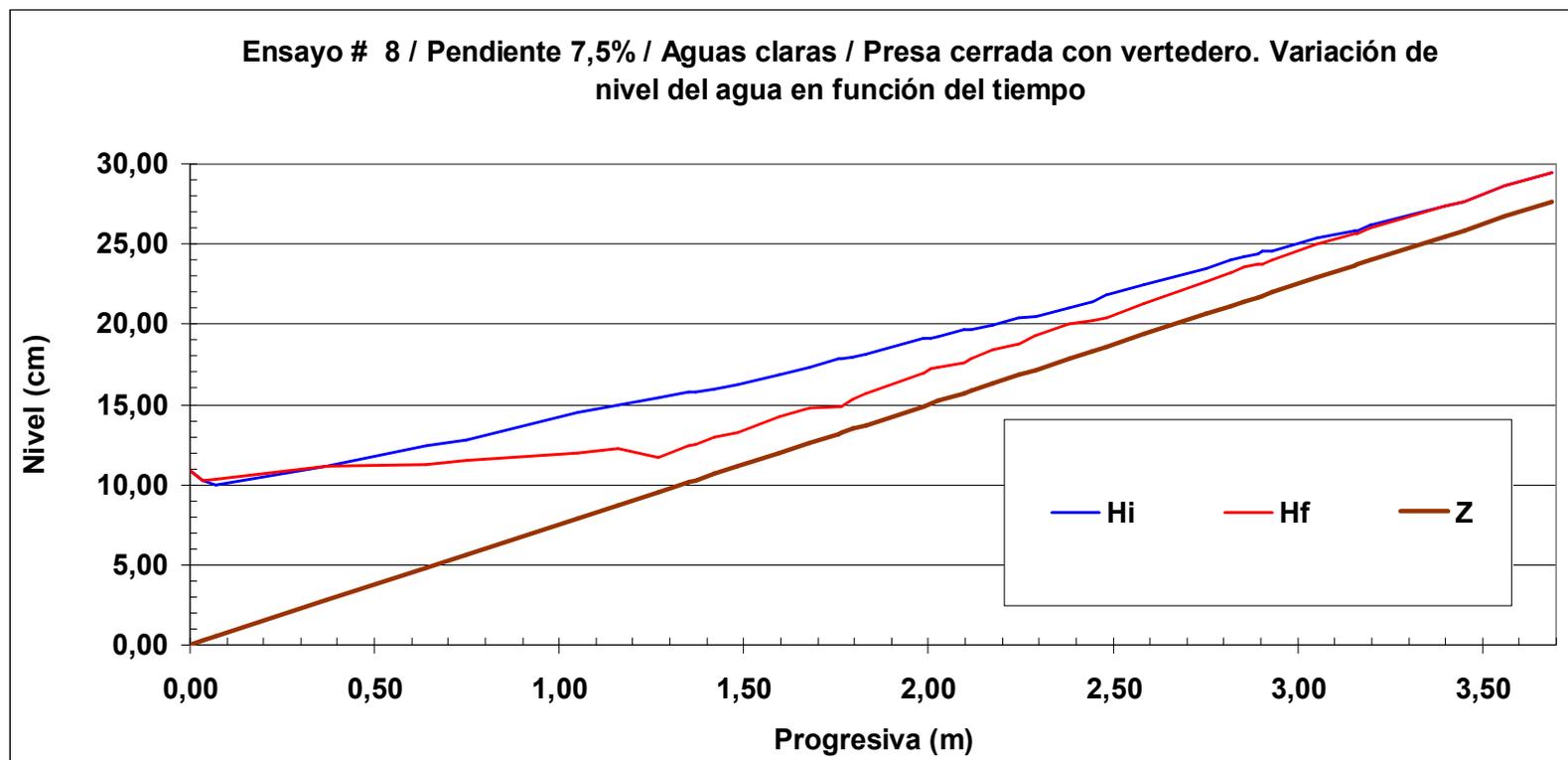


Figura 54. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 8.

4.4.2.5. Ensayo 9: Cerrada sin vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,018m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,034
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,5 m/s
Q (caudal)	0,0029 m ³ /s
S (pendiente)	0.075 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	3,51x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	9,53 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,28 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante critico)	0,021m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 3.

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración de 13 minutos (siendo este preciso tiempo, en el cual no varió más la capa de sedimentos en el fondo) (figura 56 y figura 57).

Q_{Sm} : 0,004506 m³/minuto (figura 56).

Q_{Sm} : 0,01502 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 5.32 % (figura 56).

Pendiente del frente de onda de sedimentación: La pendiente del frente del delta fue $33,53^\circ$ con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo: El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 4 (figura 58).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 55), observándose una disminución en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y a medida que se profundiza un aumento del tamaño del grano. Este comportamiento es uniforme en todo el canal, lo que permite inferir que es por causa del resalto hidráulico presente.

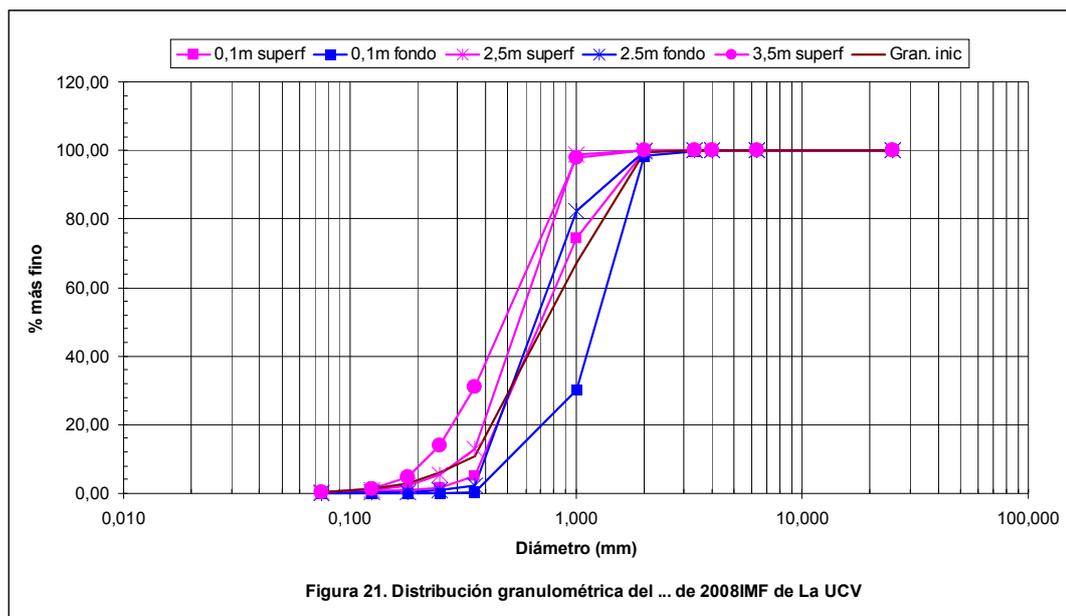


Figura 55. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 9.

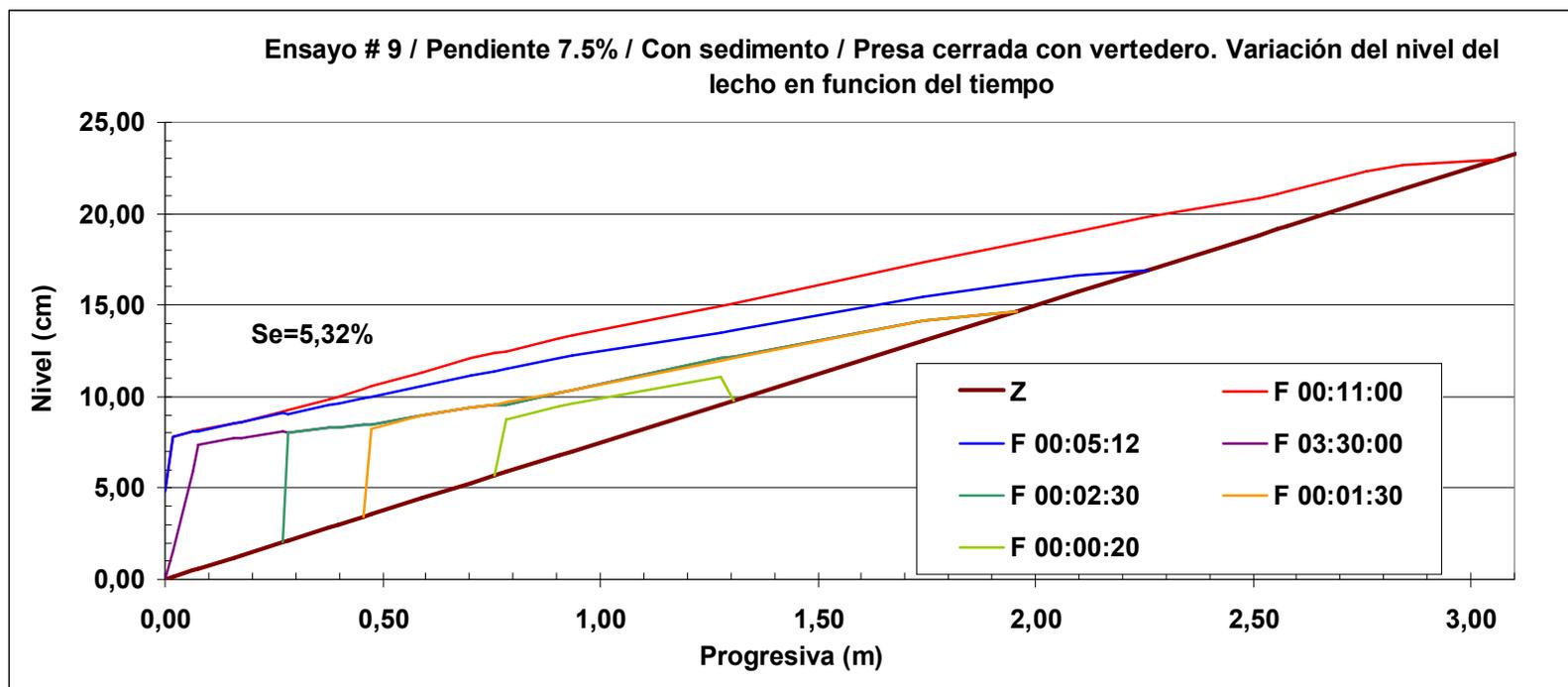


Figura 56. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 9, donde se aprecia la formación desde el primer perfil y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio.

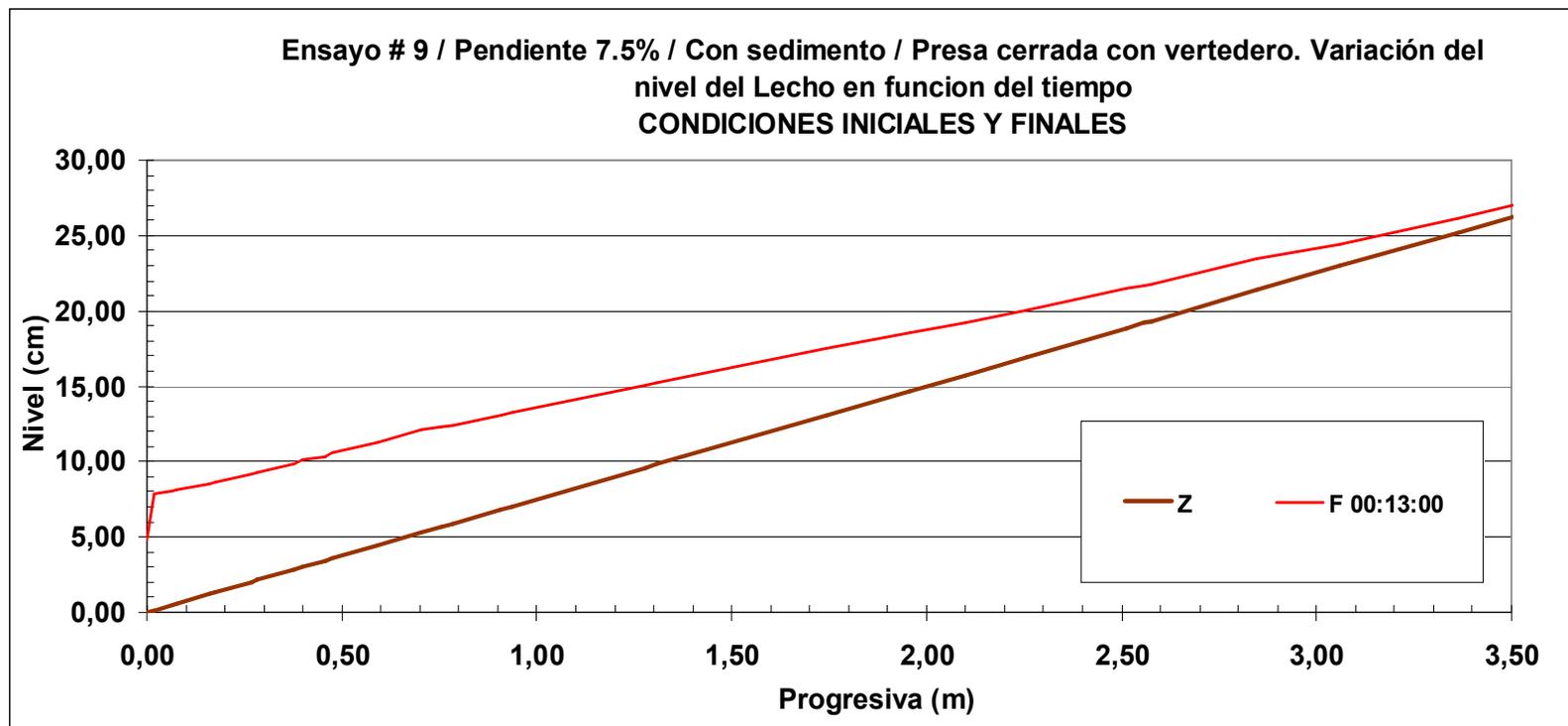


Figura 57. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 9.

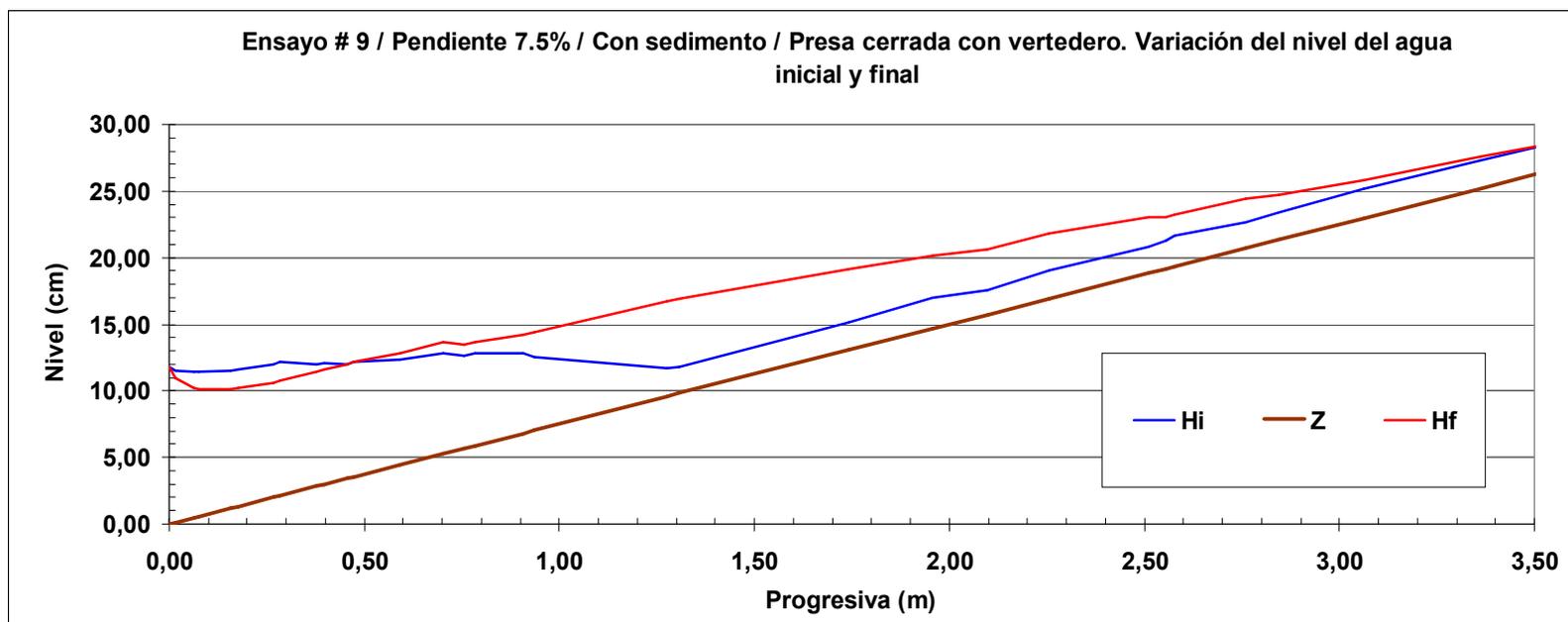


Figura 58. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 9, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.4.3. Pendiente 10%

4.4.3.1. Ensayo 10: Cerrada sin vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,016m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,037
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
θ_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,55 m/s
Q (caudal)	0,0027 m ³ /s
S (pendiente)	0.01 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	4,05x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,37 (Flujo súper critico)
y_c (tirante critico)	0,020m

En donde **y**, **v**, **Q**, **θ_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 5.

Este experimento tuvo una duración de 22 minutos, sin embargo a los 15 minutos con 40 segundos ya las variaciones en el lecho del canal no eran notorias (figura 61).

Q_{Sm} : 0,002581 m³/minuto (figura 60).

Q_{Sm} : 0,008605 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 4.99 % (figura 60).

Pendiente del frente de onda de sedimentación: La pendiente del frente del delta fue 33.51° con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo. El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 5 (figura 62).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 59), observándose, una disminución en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y a medida que se profundiza en el fondo un aumento en el tamaño del grano para todas las muestras tomadas de igual manera.

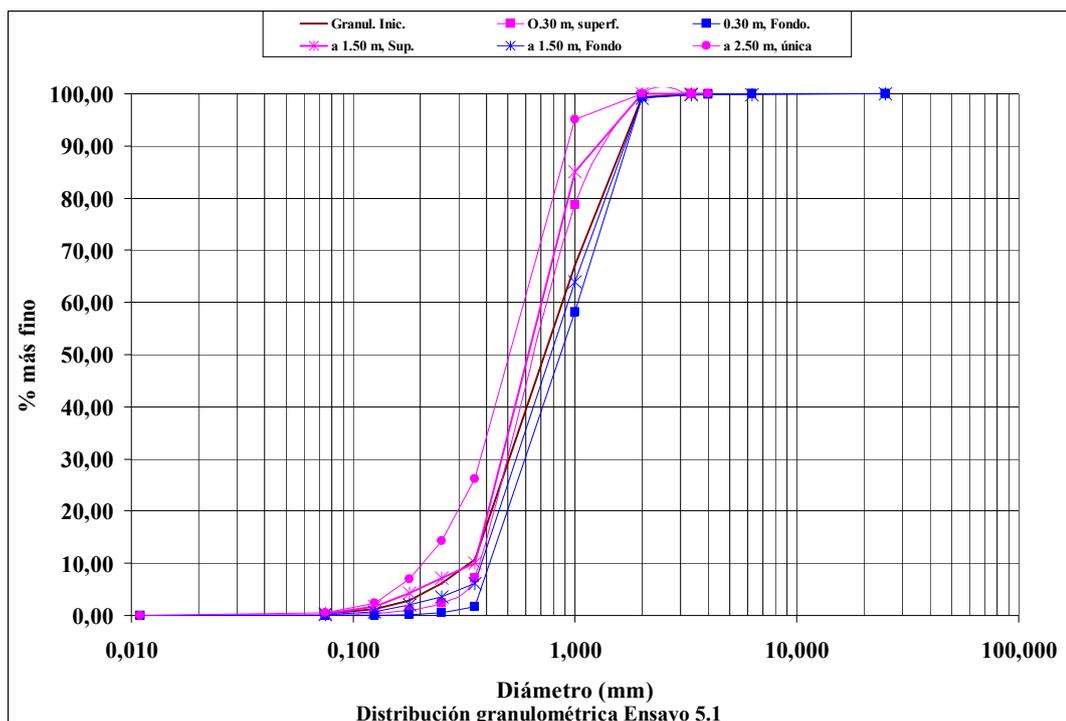


Figura 59. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 10.

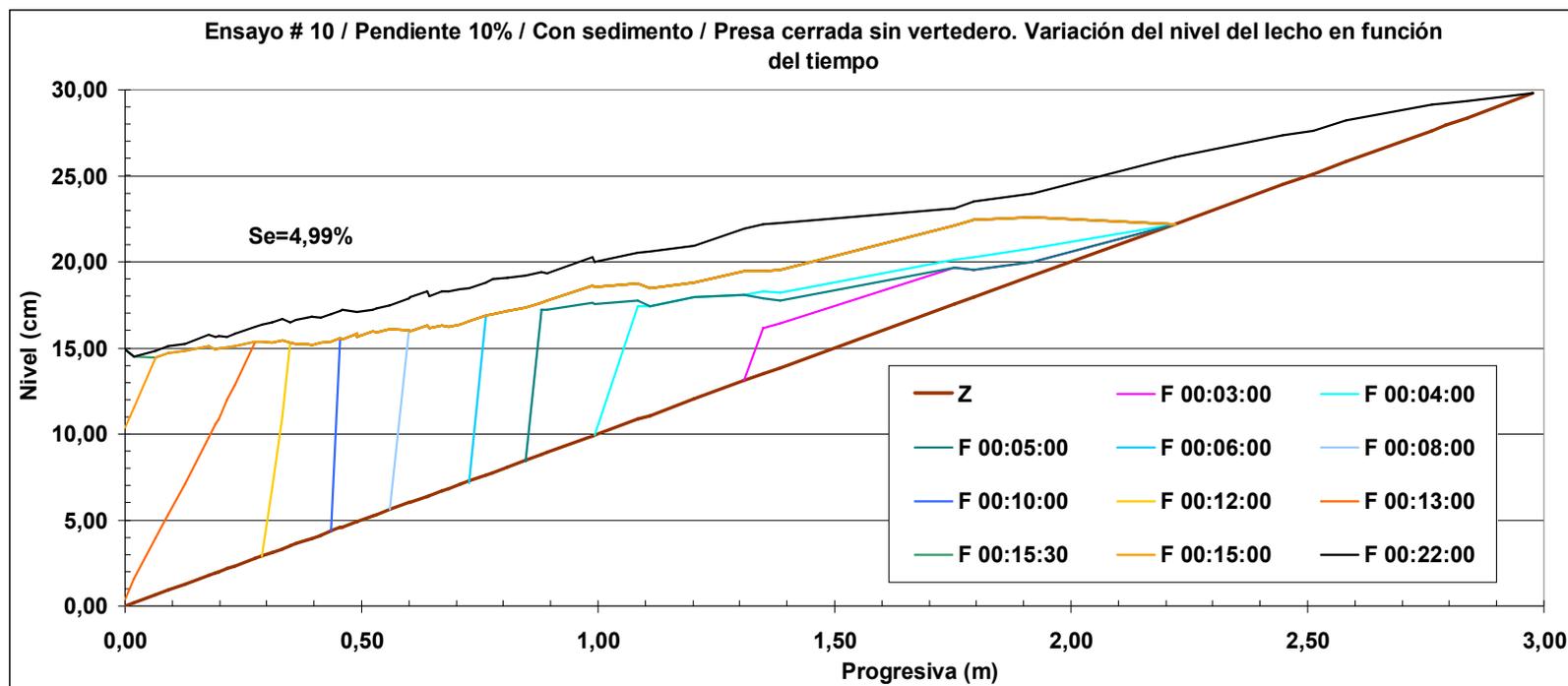


Figura 60. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 10, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (F00:03:00) y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio (F00:22:00).

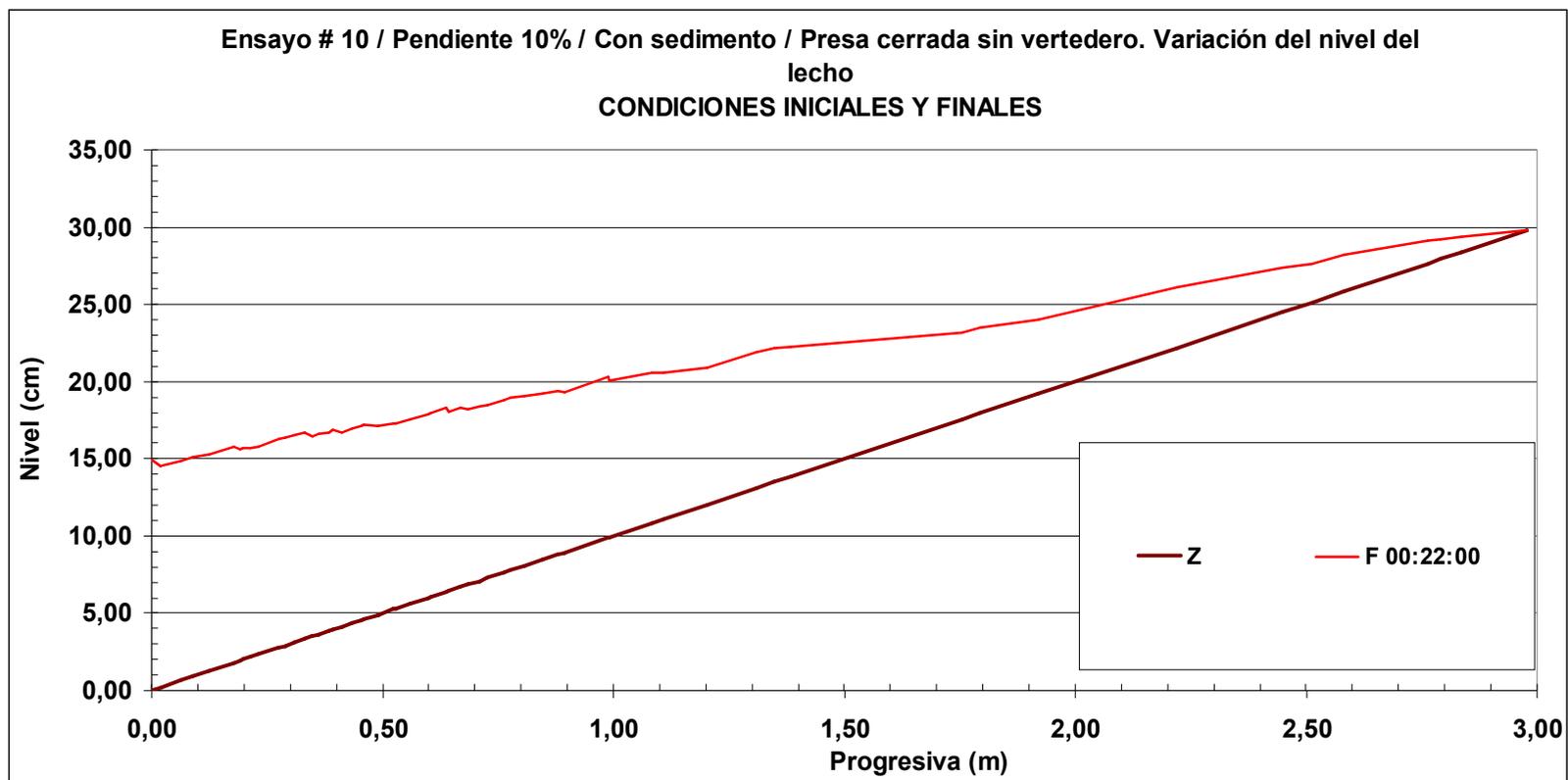


Figura 61. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 10.

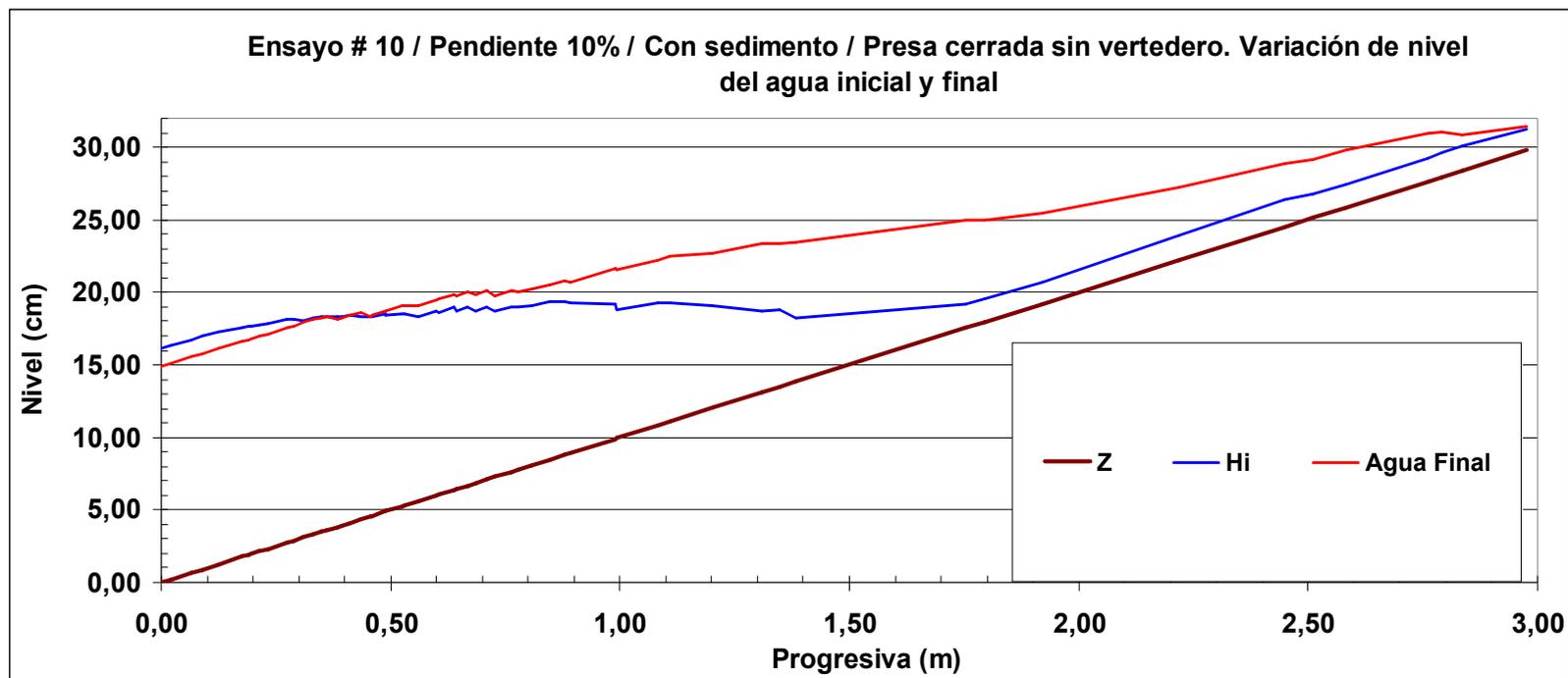


Figura 62. Perfiles de los niveles de agua inicial y final referentes al ensayo 10, se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final, también se aprecia que se disipa el resalto hidráulico.

4.4.3.2. Ensayo 11: Cerrada sin vertedero. Aguas claras

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,016m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,037
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,55 m/s
Q (caudal)	0,0027 m ³ /s
S (pendiente)	0.01 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	4,05x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,37 (Flujo súper critico)
y_c (tirante critico)	0,020m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 6 (figura 63).

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración de 30 minutos, tiempo en el cual ya las variaciones en el lecho del canal no eran despreciables.

El proceso de degradación se presentó entre los 1.5 m y los 3 m aproximadamente aguas arriba de la presa (figura 64).

Q_{Sm} : 0,001616 m³/minuto (figura 63).

Q_{Sm} : 0,005387 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 0.20 % (figura 63).

Variación del perfil de flujo. El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 6 (figura 65).

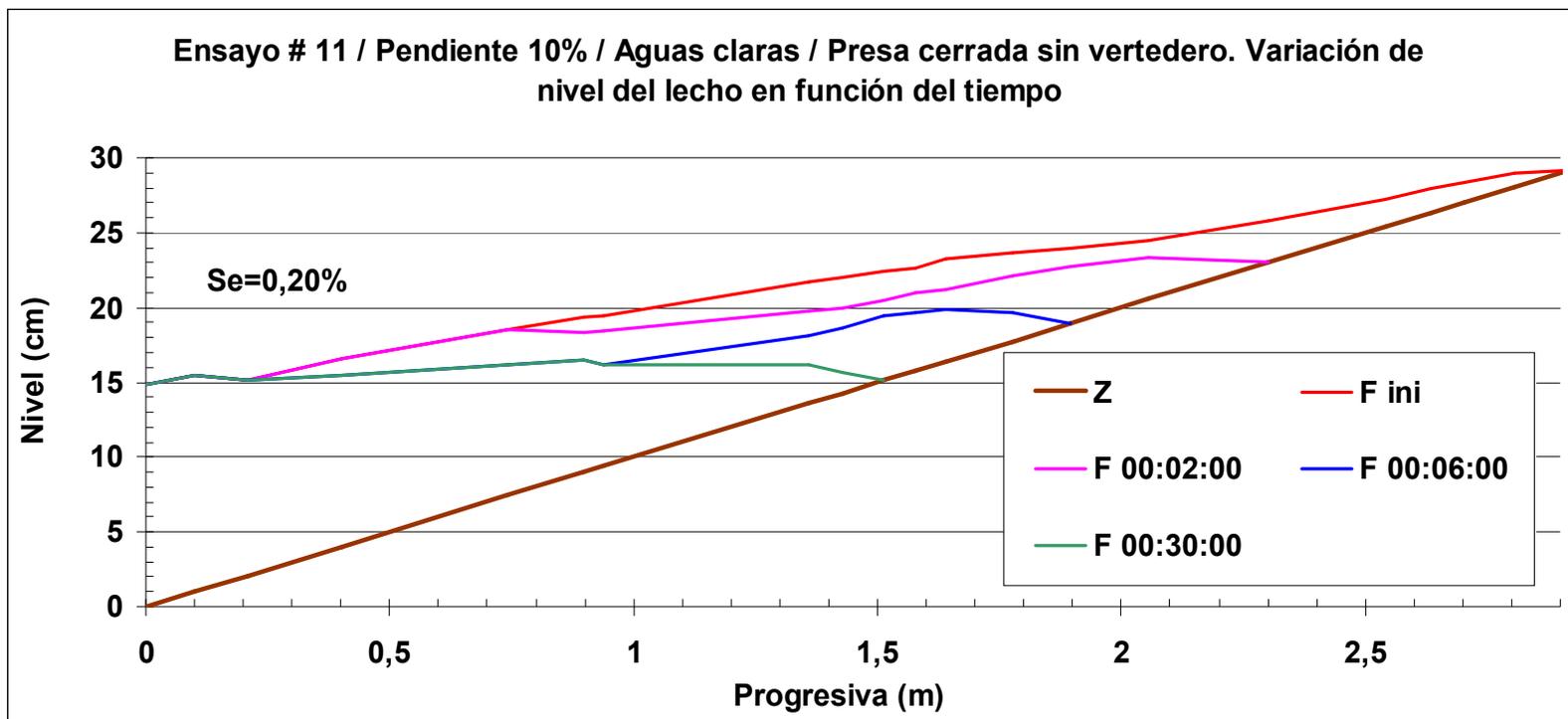


Figura 63. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 11, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del lecho del canal desde el momento de inicio (F INI) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (F30:00:00).

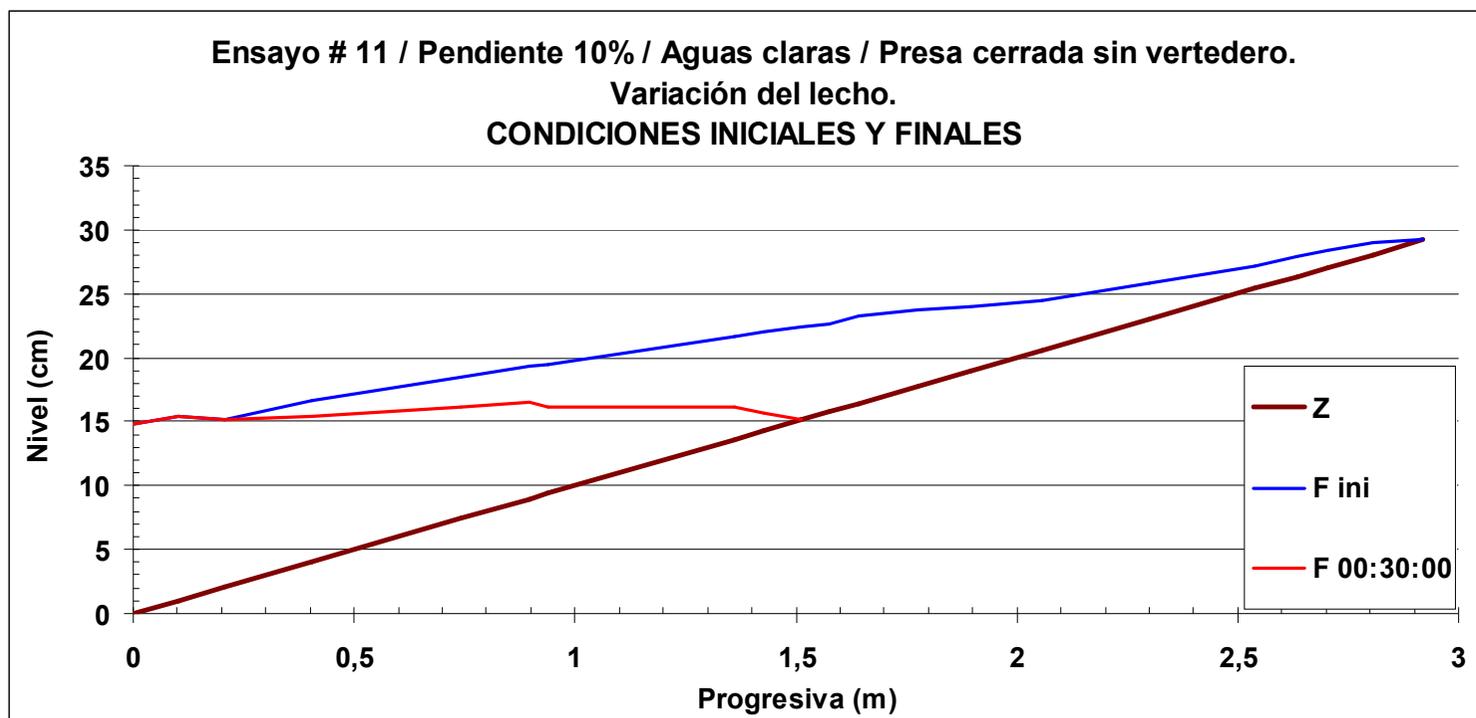


Figura 64. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 11.

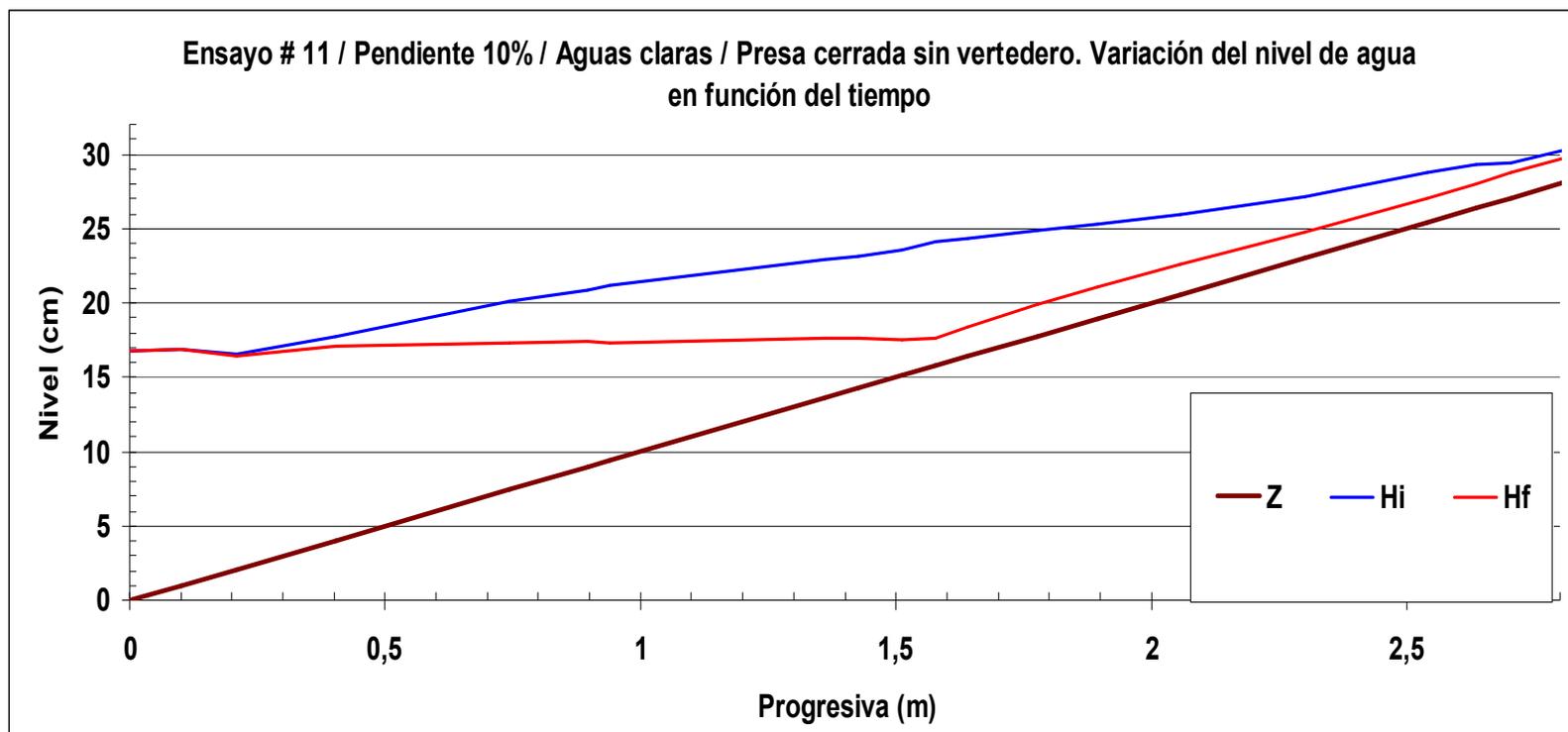


Figura 65. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 11, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.4.3.3. Ensayo 12: Cerrada con vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,016m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,037
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,55 m/s
Q (caudal)	0,0027 m ³ /s
S (pendiente)	0.01 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	4,05x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,37 (Flujo súper critico)
y_c (tirante critico)	0,020m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 7 (figura 68).

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración de 25 minutos, sin embargo a los 11 minutos ya las variaciones en el lecho del canal no eran notorias. (figura 67).

Q_{Sm} : 0,002116 m³/minuto (figura 67).

Q_{Sm} : 0,007054 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 6.17 % (figura 67).

Pendiente del frente de onda de sedimentación: La pendiente del frente del delta fue $33,02^\circ$ con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo. El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 7 (figura 69).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 66), observándose, una disminución en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y a medida que se profundiza en el fondo un aumento en el tamaño del grano para todas las muestras tomadas de igual manera.

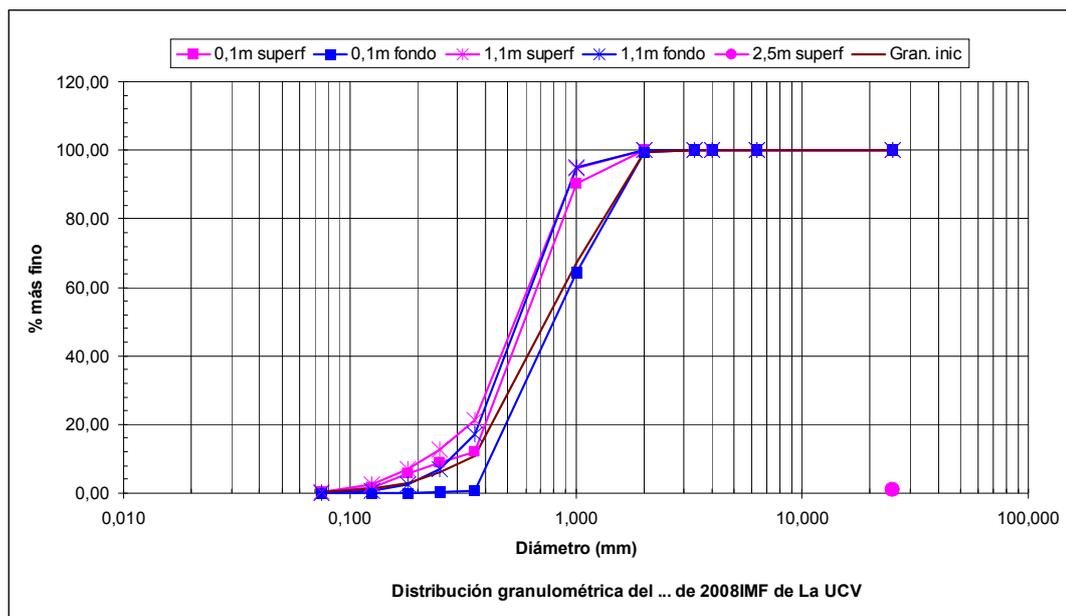


Figura 66. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 12.

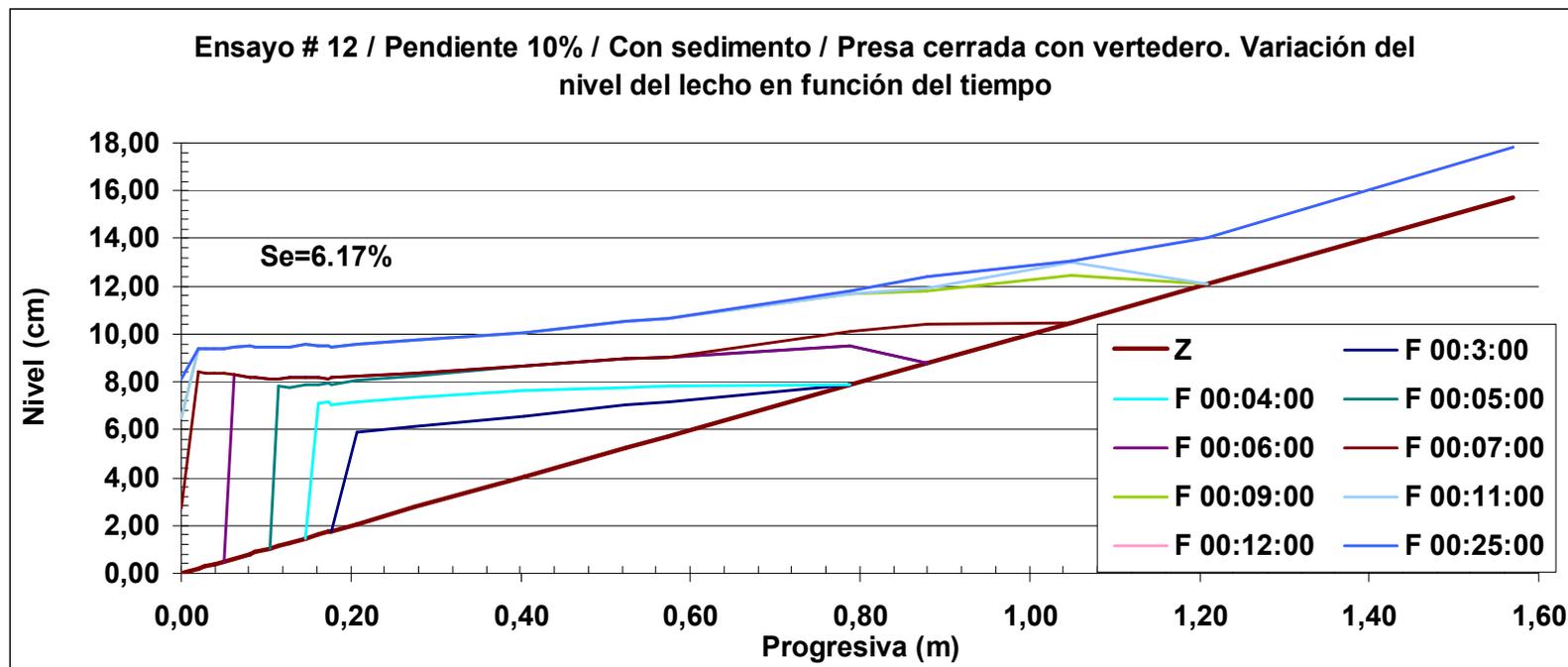


Figura 67. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 12, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (F00:03:00) y su avance hasta el perfil de equilibrio (F00:25:00).

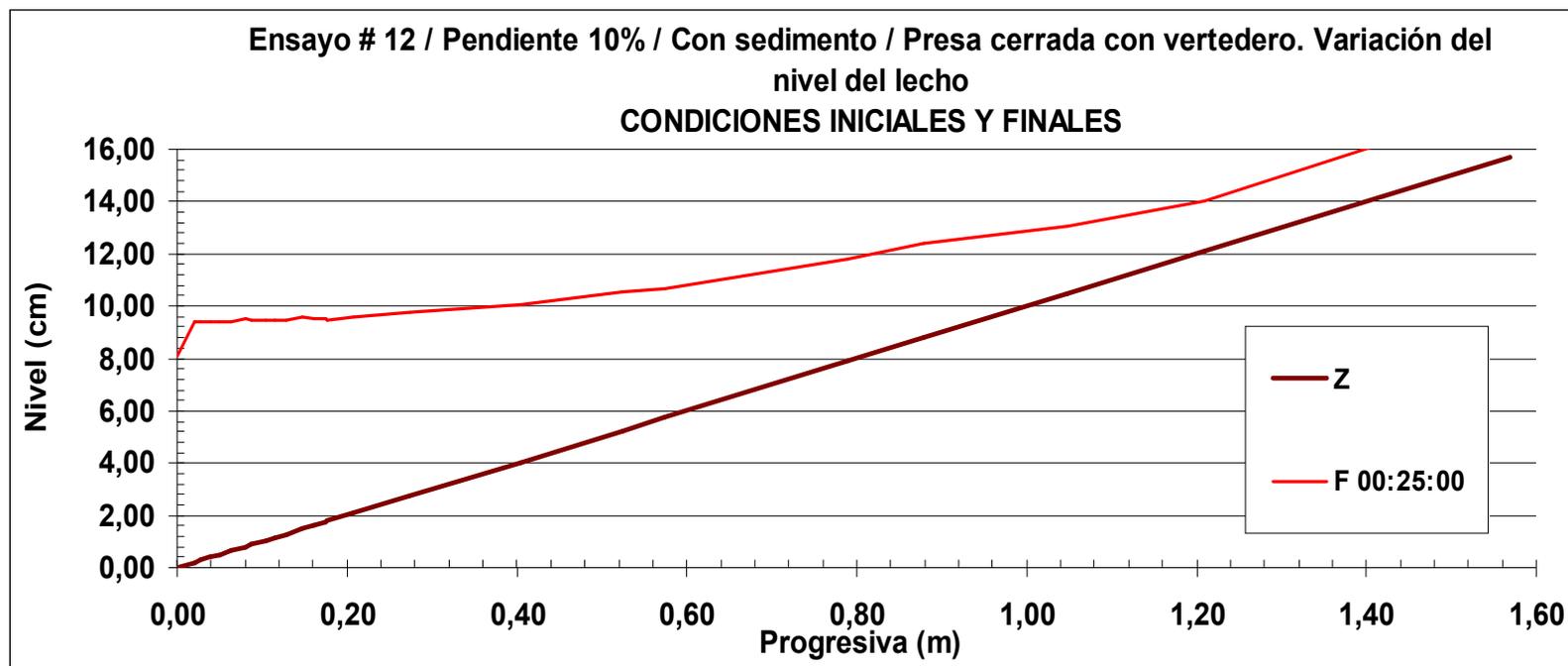


Figura 68. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 1.

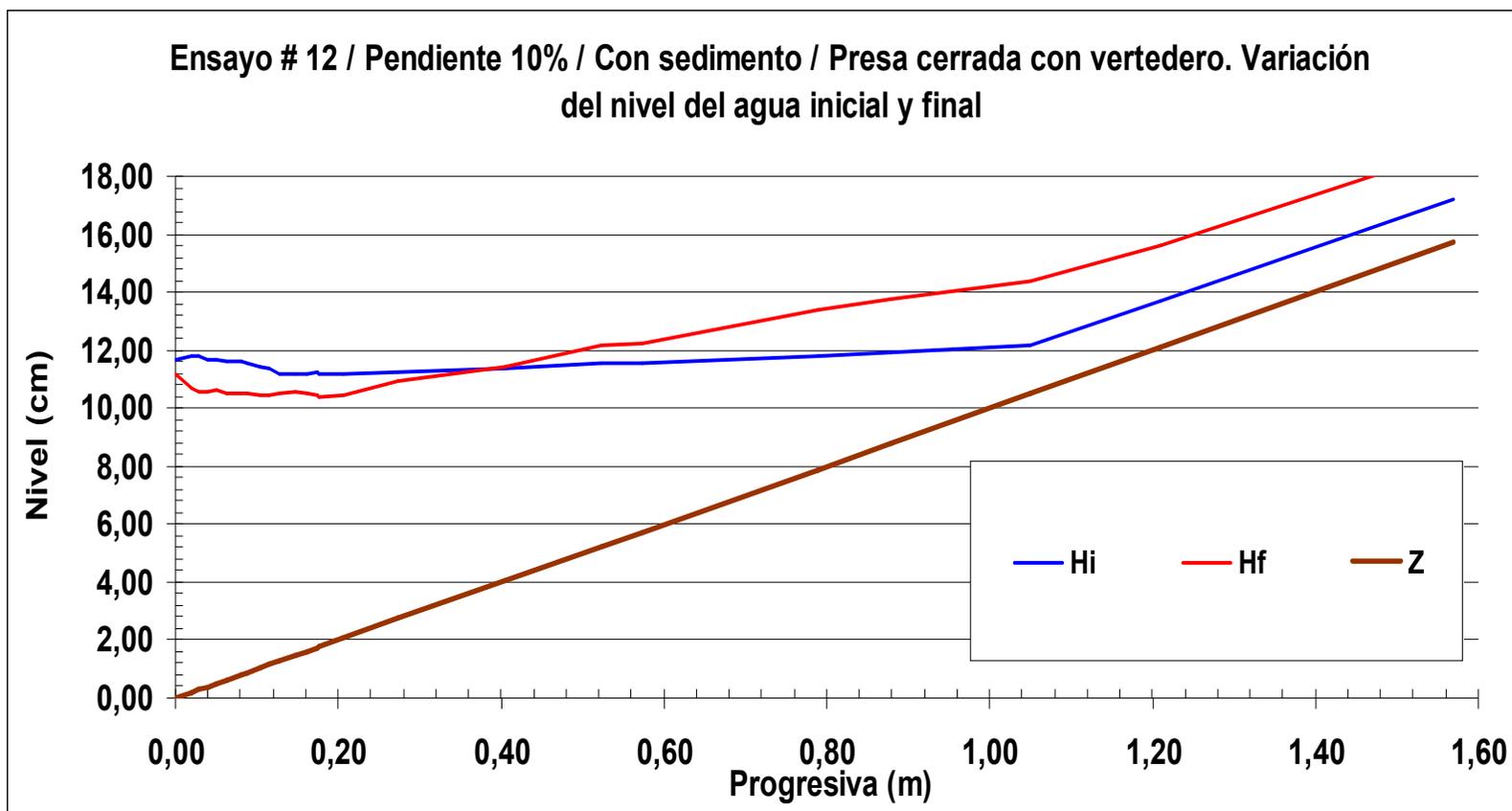


Figura 69. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 12, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.4.3.4. Ensayo 13: Cerrada con vertedero. Aguas claras

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,016m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,037
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,55 m/s
Q (caudal)	0,0027 m ³ /s
S (pendiente)	0.01 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	4,05x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	4,760 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,37 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante critico)	0,020m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 8 (figura 70).

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración de 16 minutos, tiempo en el cual las variaciones en el lecho del canal no eran despreciables.

El proceso de degradación se presentó entre los 0.8 m aproximadamente y los 1.6 m aguas arriba de la presa (figura 71).

Q_{Sm} : 0,001655 m³/minuto (figura 70).

Q_{Sm} : 0,005518 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de -0.78 % (figura 70).

Variación del perfil de flujo. El flujo evolucionó de forma similar al ensayo 8 (figura 72).

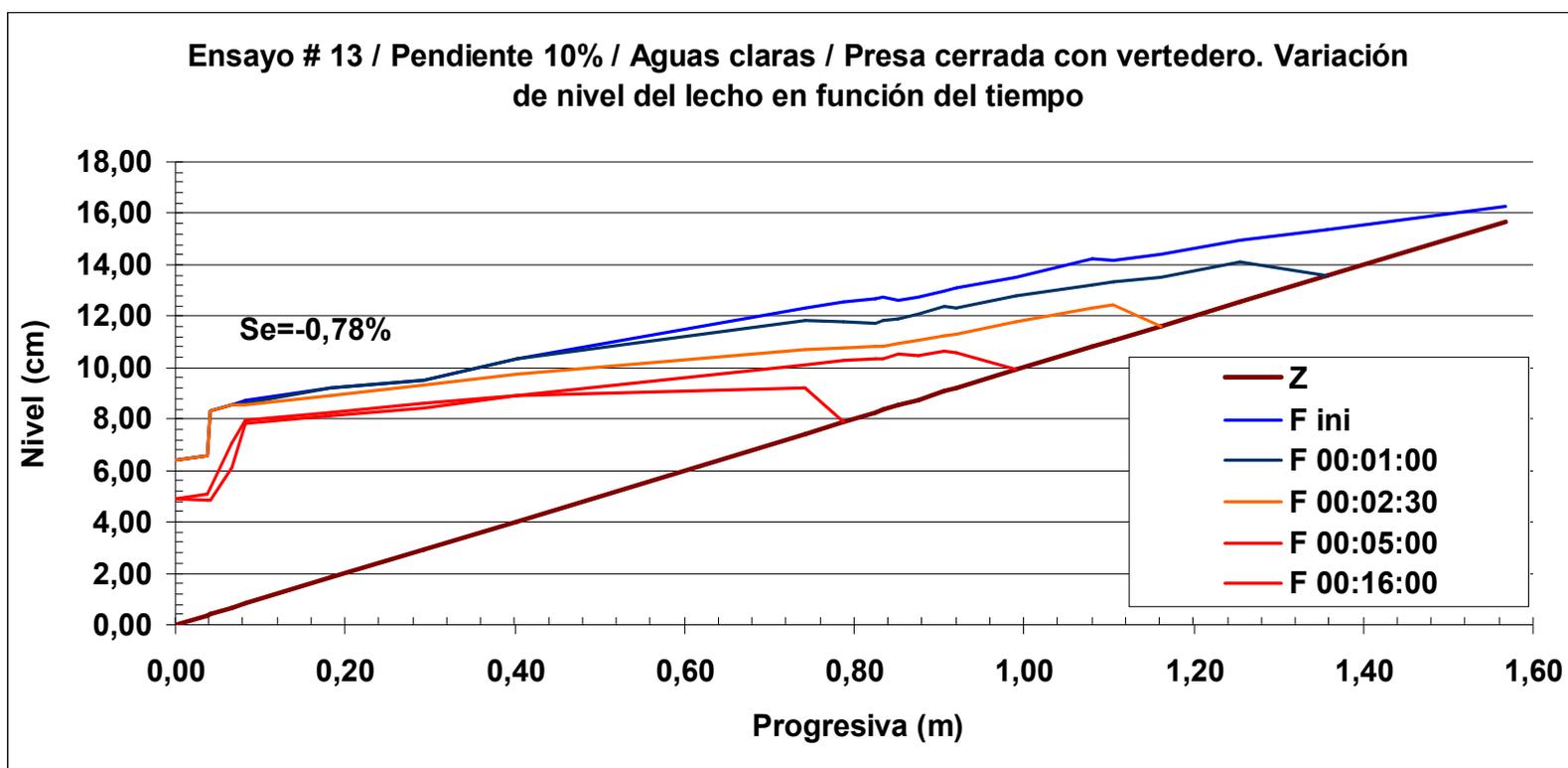


Figura 70. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 13, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (F00:01:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (F00:16:00).

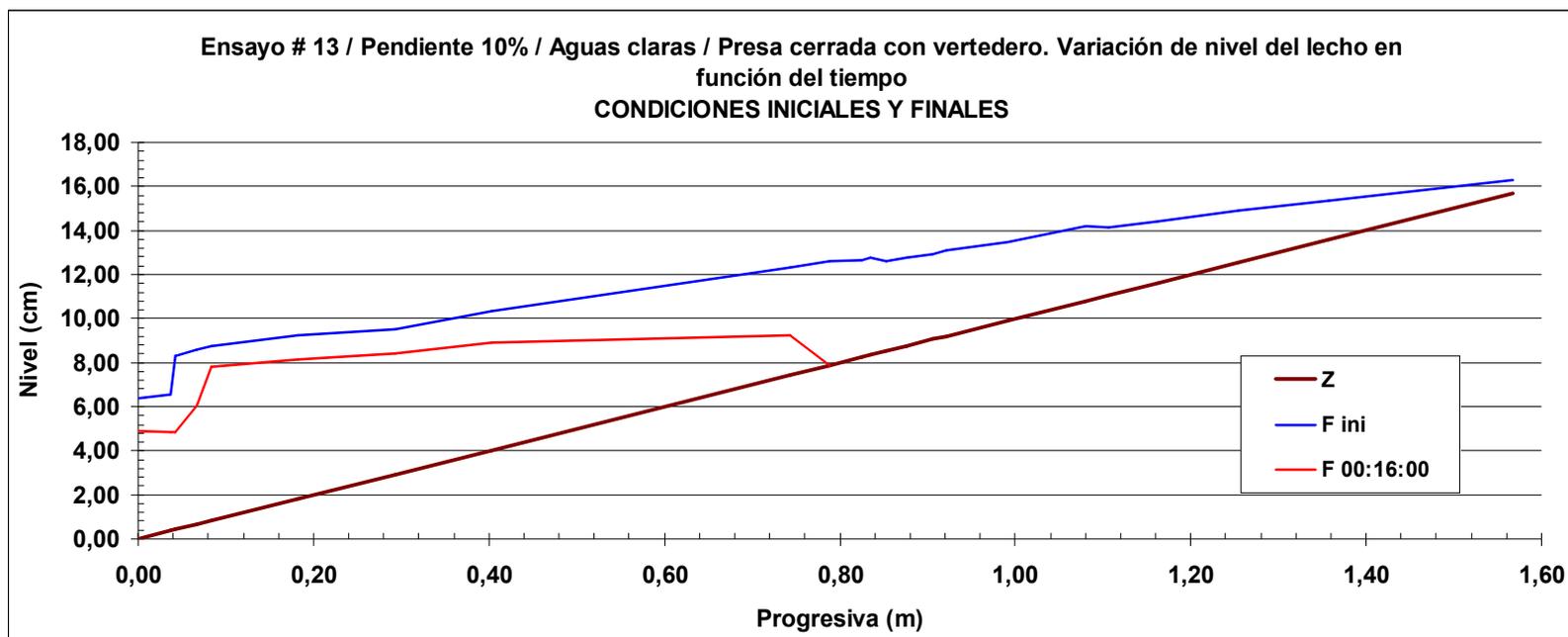


Figura 71. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 13.

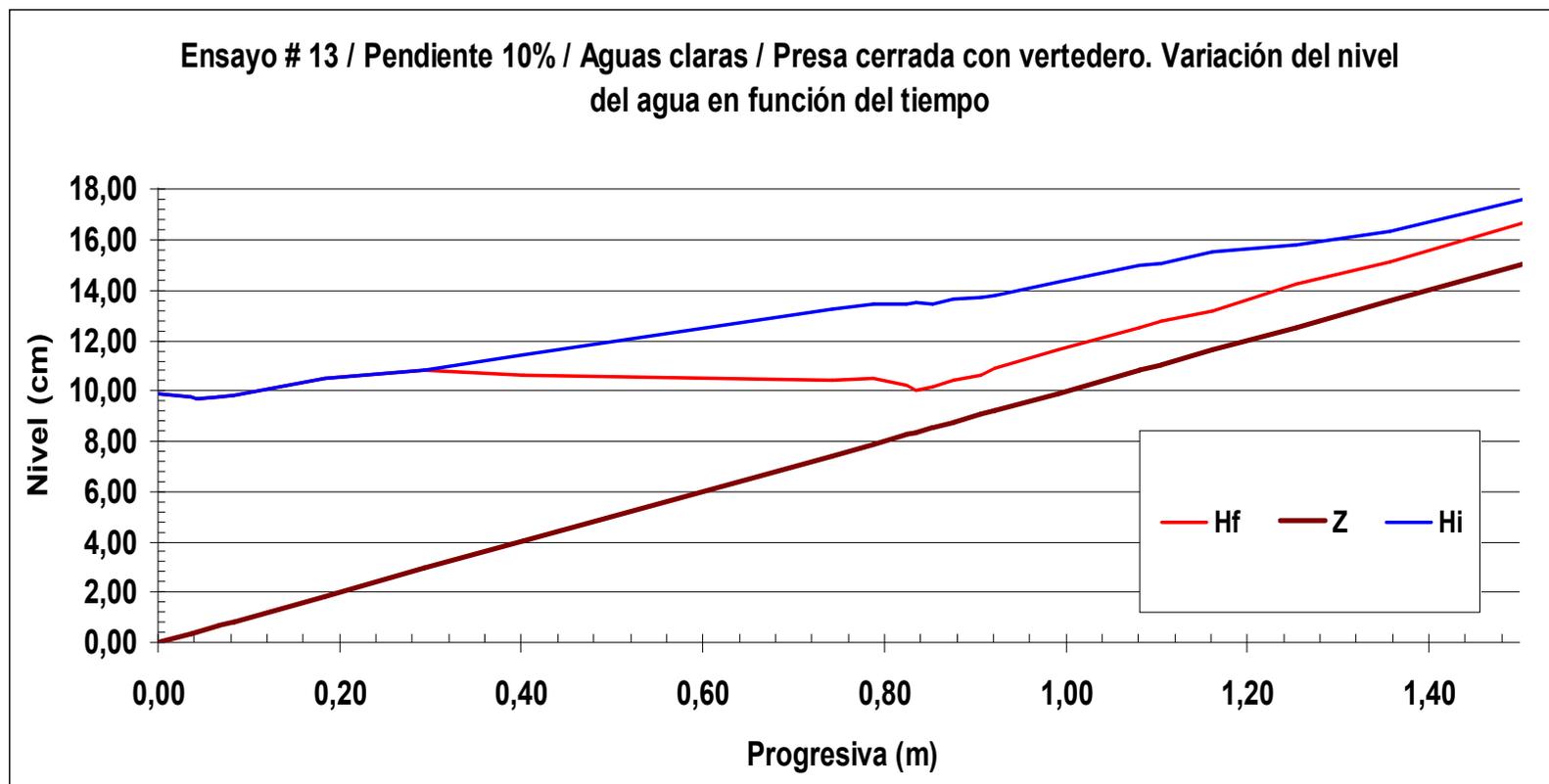


Figura 72. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 13, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.4.3.5. Ensayo 14: Cerrada con vertedero.

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,016m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,037
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,55 m/s
Q (caudal)	0,0027 m ³ /s
S (pendiente)	0.01 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	4,05x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	9,53 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,37 (Flujo súper critico)
y_c (tirante critico)	0,020m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1.

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 7 (figura 74).

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración de 10 minutos, sin embargo a los 9 minutos ya las variaciones en el lecho del canal no eran notorias (figura 75).

Q_{Sm} : 0,004393 m³/minuto (figura 74).

Q_{Sm} : 0,01464 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 7.38 % (figura 74).

Pendiente del frente de onda de sedimentación: La pendiente del frente del delta fue 24.22° con respecto a la horizontal.

Variación del perfil de flujo. El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 7 (figura 76).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 73), observándose, una disminución en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y a medida que se profundiza en el fondo un aumento en el tamaño del grano para todas las muestras tomadas de igual manera; sin embargo en las adyacencias de la presa el tamaño del grano no varía considerablemente.

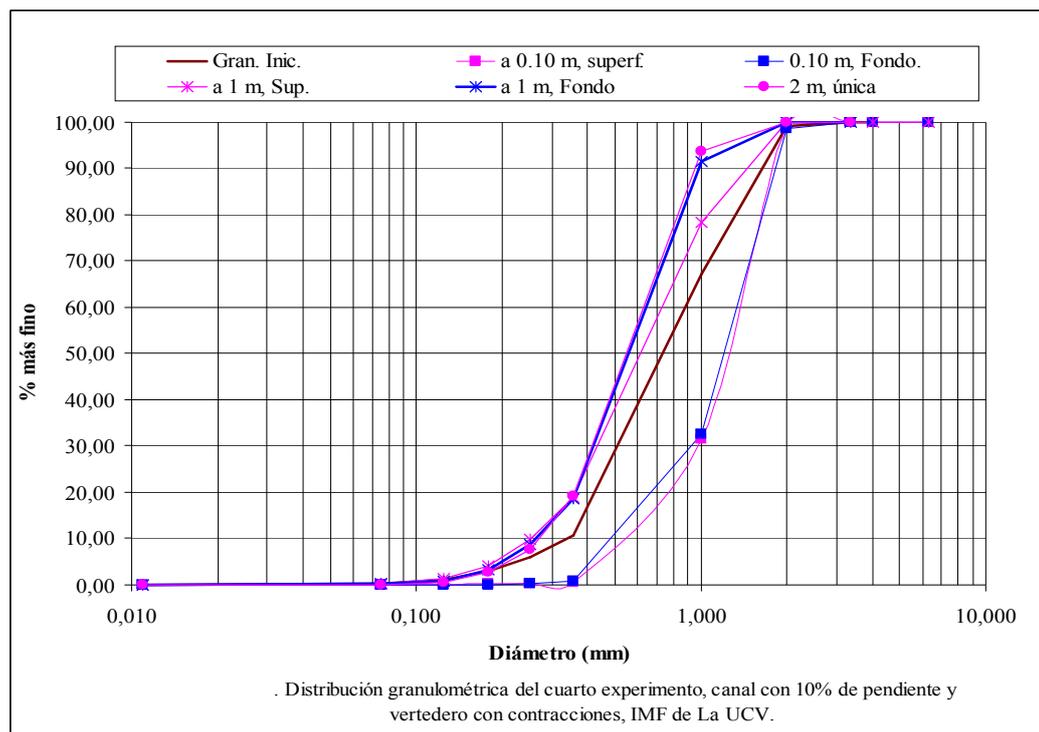


Figura 73. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 14.

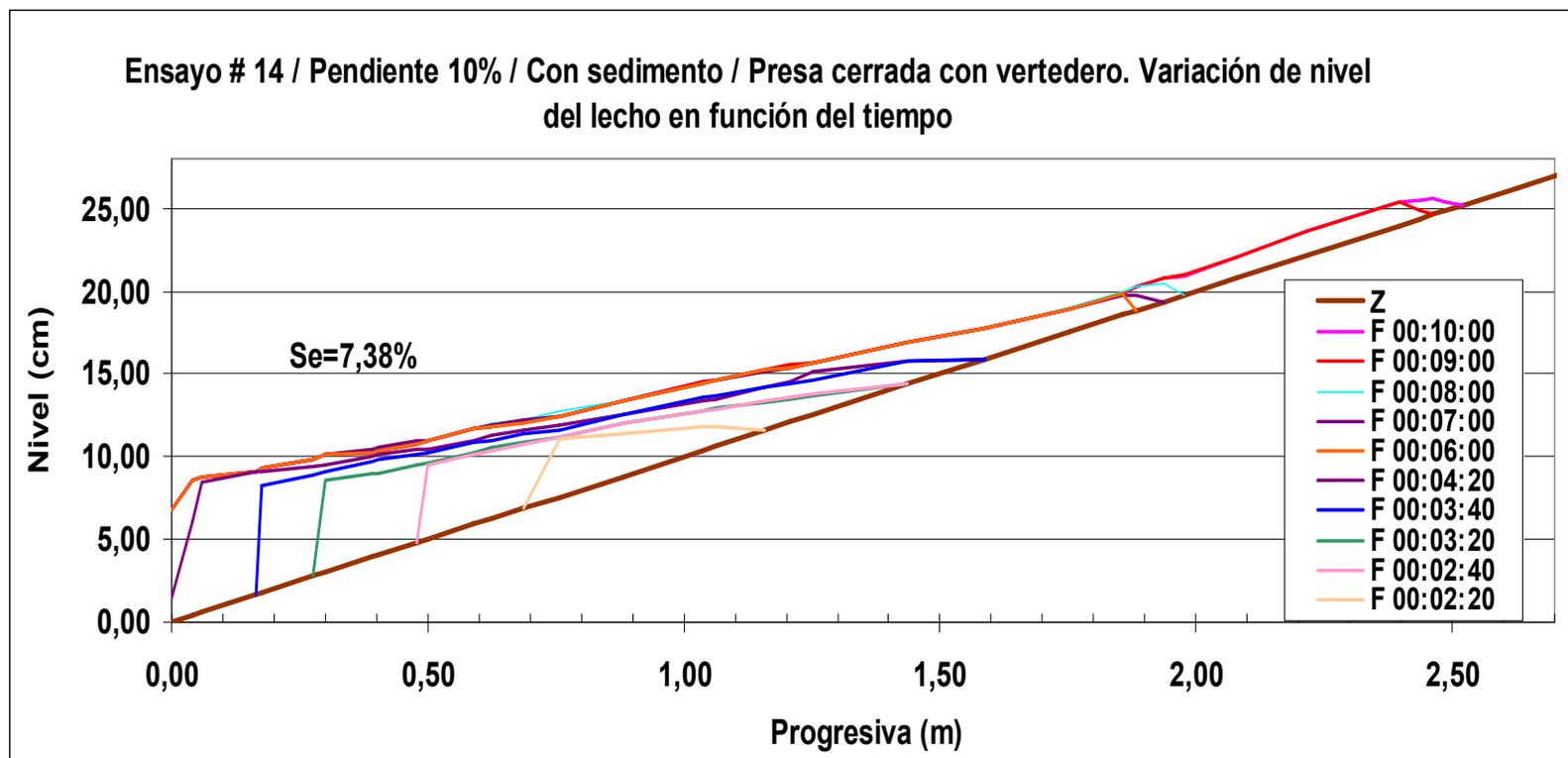


Figura 74. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 14, donde se aprecia la formación desde el primer perfil (F00:02:20) y su avance en intervalos hasta el perfil de equilibrio (F00:10:00).

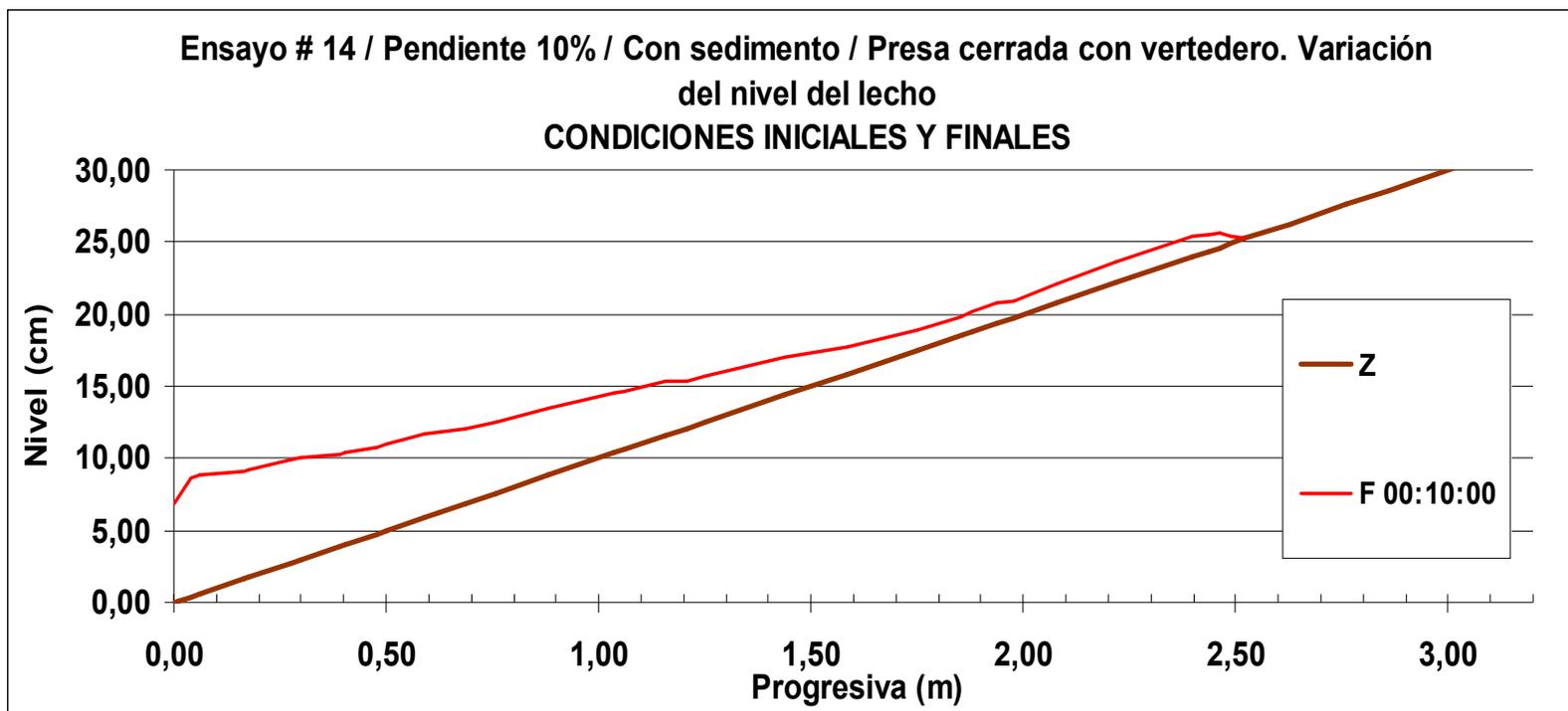


Figura 75. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 14.

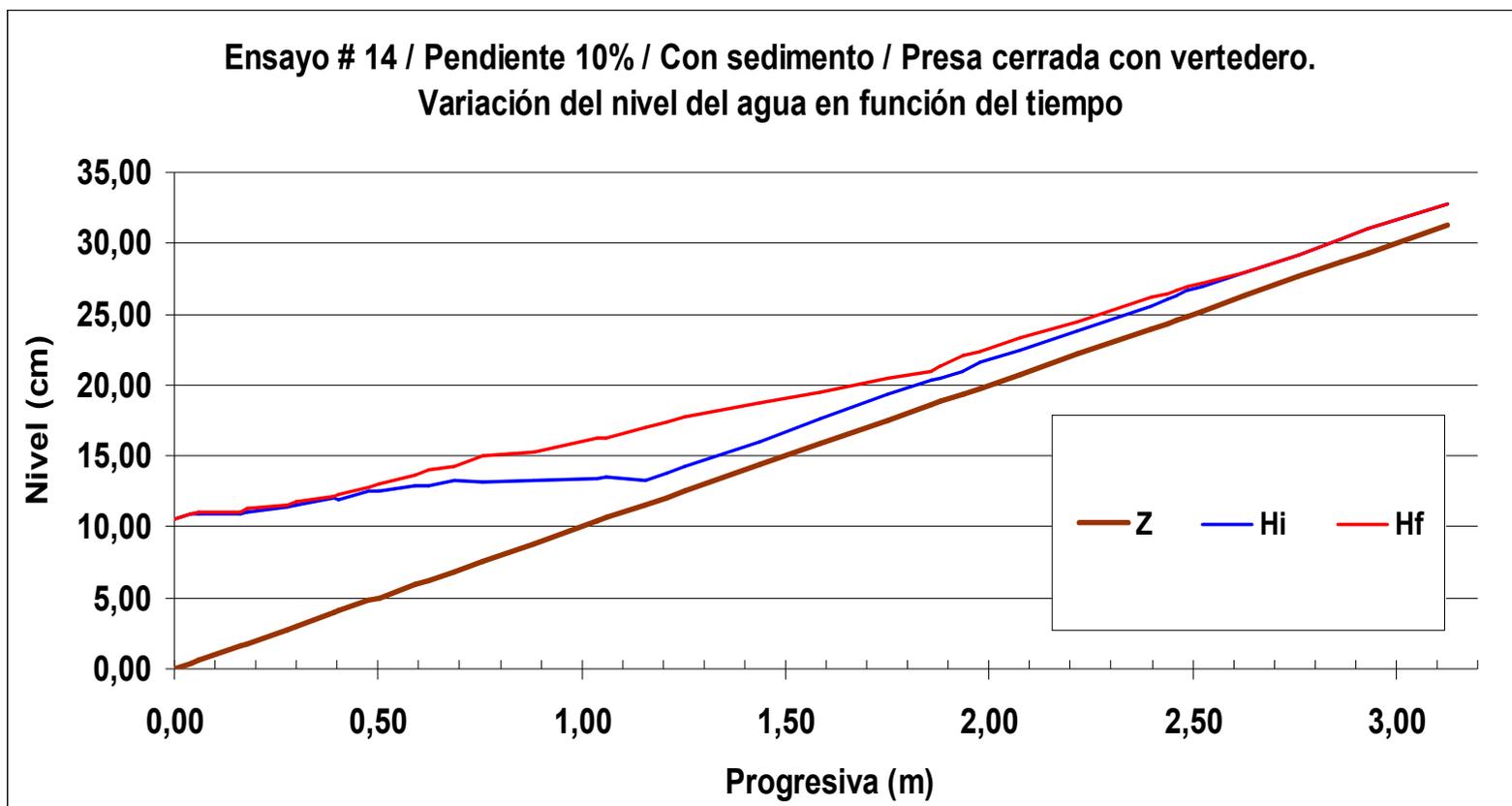


Figura 76. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 14, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.4.3.6. Ensayo 15: Cerrada con vertedero. Aguas claras

Los siguientes son las variables controladas en el experimento:

L (largo del canal)	8m
B (ancho del canal)	0,3m
y (tirante o lámina del flujo Promedio)	0,016m
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el fondo del canal)	0,037
η (coeficiente de rugosidad de Manning para el vidrio del canal)	0,010
η (coeficiente de rugosidad de Manning para la madera del canal)	0,012
\emptyset_{fondo} (Diámetro promedio de roca en fondo del canal)	0,02m
v (velocidad del flujo)	0,55 m/s
Q (caudal)	0,0027 m ³ /s
S (pendiente)	0.01 m/m
Q_{sc} (capacidad de arrastre)	4,05x10 ⁻⁴ m ³ /s
Q_s (caudal sólido suministrado)	9,53 x10 ⁻⁵ m ³ /s
F (Número de Froude)	1,37 (Flujo súper crítico)
y_c (tirante critico)	0,020m

En donde **y**, **v**, **Q**, **\emptyset_{fondo}** , **η** , **F**, **y_c**, **Q_{sc}**, **Q_s** fueron descritas en el ensayo 1

La respuesta del sistema fue la siguiente:

Variación del perfil de fondo: Las observaciones obtenidas como respuesta del sistema, son similares para las condiciones de flujo uniforme y gradualmente variado descritas anteriormente en el ensayo 8 (figura 79).

Tomando en cuenta:

Este experimento tuvo una duración total de 9 minutos, sin embargo a partir de los 2 minutos 30 segundos las variaciones en el lecho del canal no eran apreciables.

El proceso de degradación se presentó entre los 0.68 m aproximadamente y los 2 m aguas arriba de la presa (figura 79).

Q_{Sm} : 0,003906 m³/minuto (figura 78).

Q_{Sm} : 0,01302 m³/minuto*m.

Las anteriores variables han sido definidas previamente.

Pendiente de compensación: La pendiente de compensación o de equilibrio lograda fue de 0.92 % (figura 78).

Variación del perfil de flujo. El perfil de agua evolucionó de forma similar al ensayo 8 (figura 80).

Variación de la granulometría: La distribución granulométrica varió a lo largo del canal y la en columna vertical (figura 77), observándose una disminución en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y a medida que se profundiza en el fondo un aumento en el tamaño del grano para todas las muestras tomadas, de igual manera en las adyacencias de la presa el tamaño del grano no varía considerablemente. Otro aspecto resaltante es la diferencia existente entre los tamaño del grano presentes en la margen derecha e izquierda del canal, siendo más grandes los granos que se encuentran hacia la madera manifestando un mayor efecto de acorazamiento con relación a los que se encuentran hacia el vidrio.

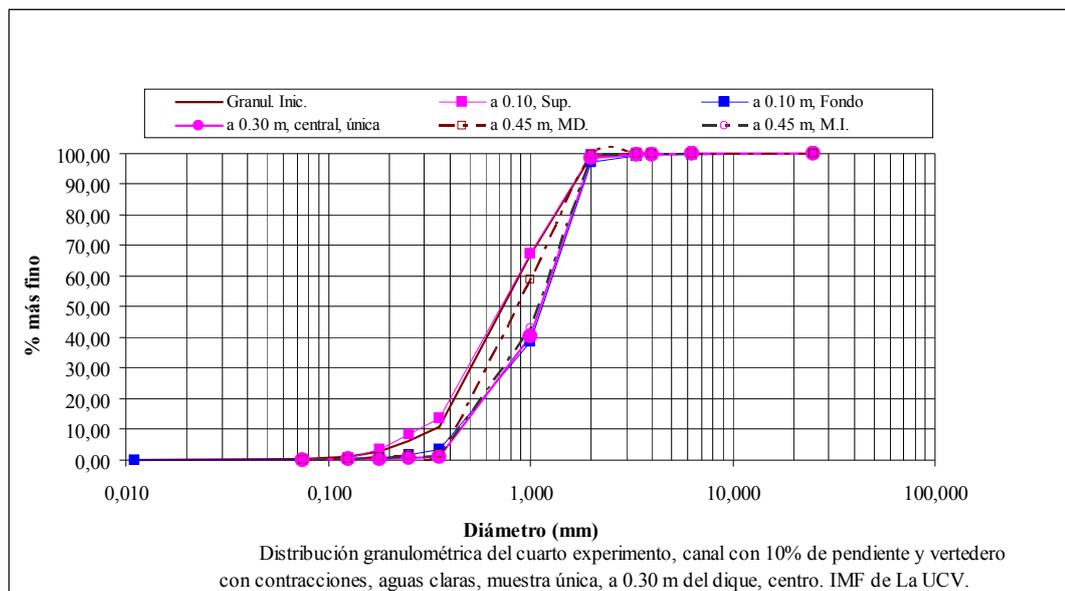


Figura 77. Análisis granulométricos realizados a diferentes profundidades y a distancias uniformes de la presa cerrada hacia aguas arriba para el ensayo 15.

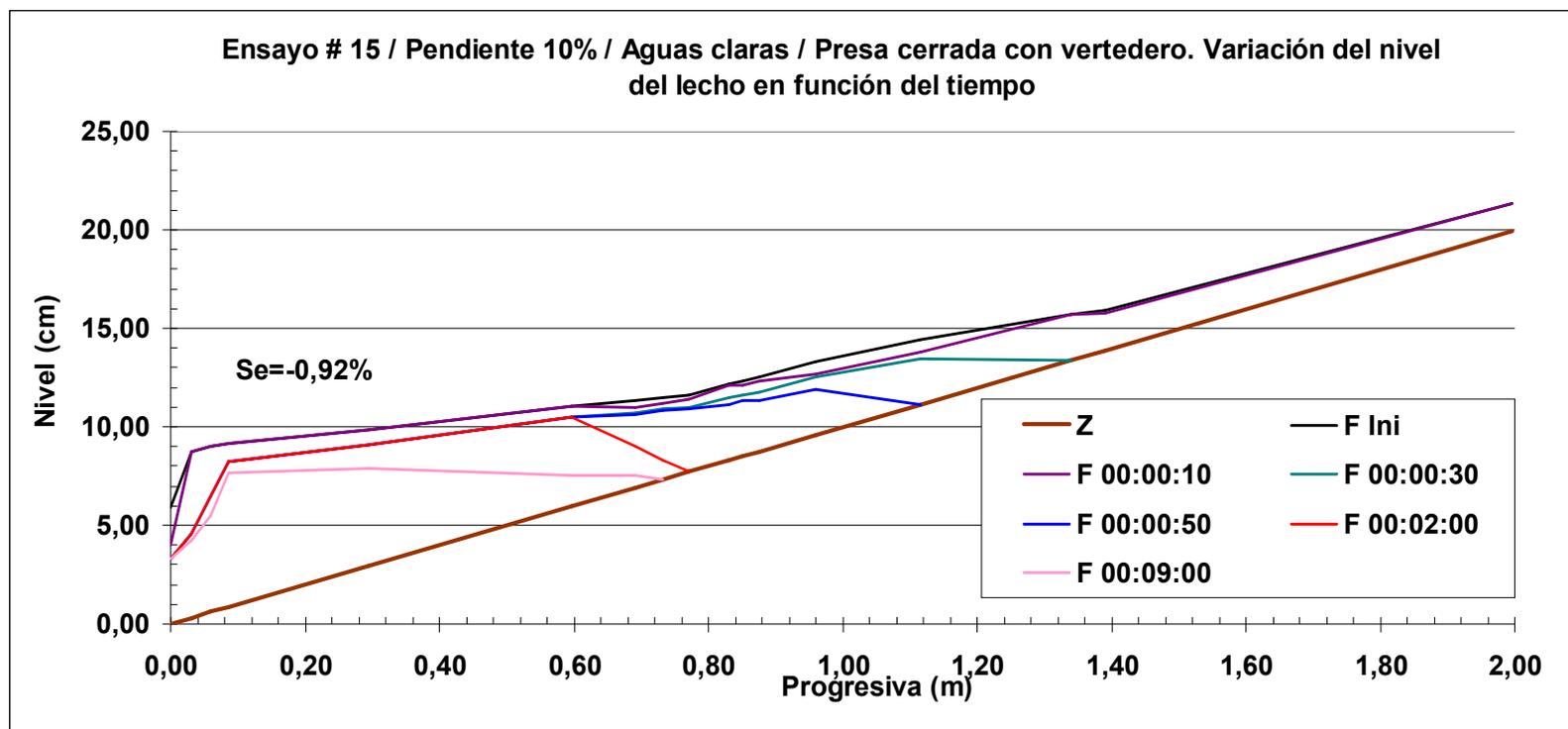


Figura 78. Variación espacial y temporal del perfil del lecho observado en el ensayo 15, donde se aprecia el efecto gradual de la erosión o degradación del sedimento del fondo del canal desde el momento de inicio (F00:02:00) y su avance hasta alcanzar el perfil de equilibrio (F00:09:00).

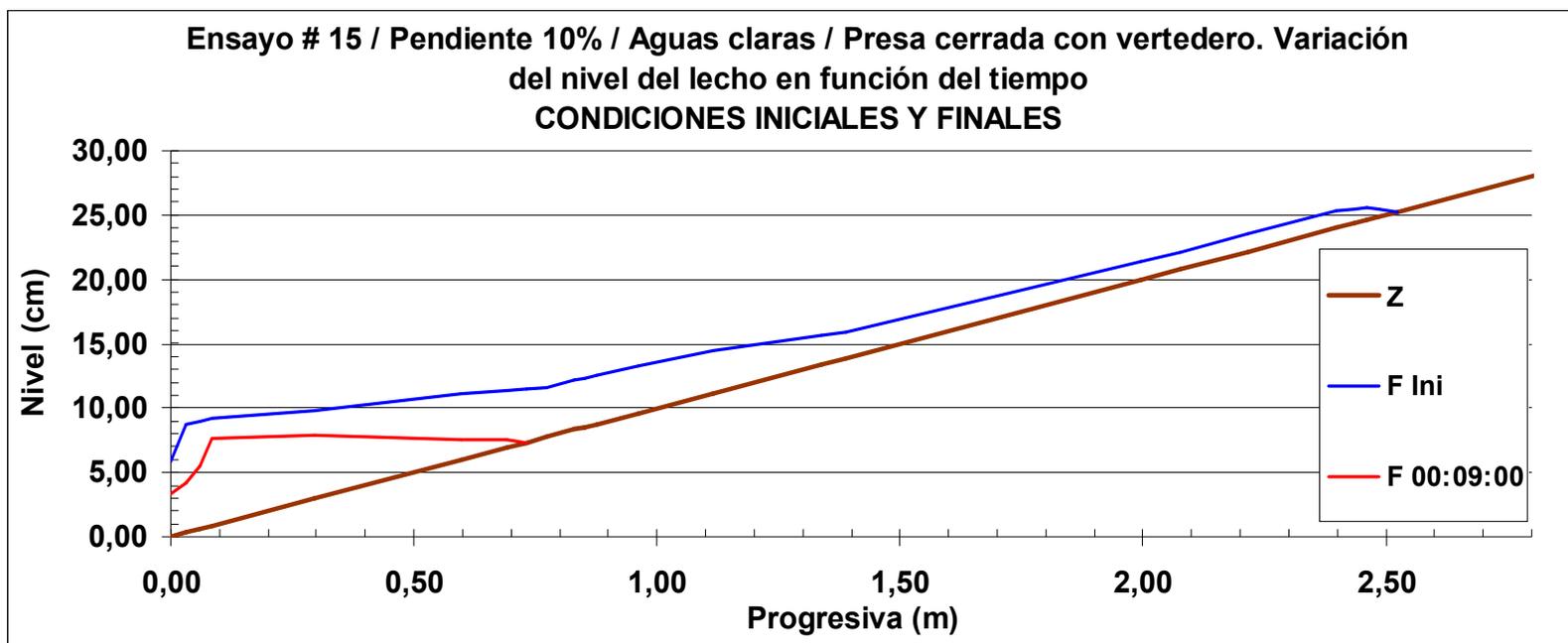


Figura 79. Perfiles de los niveles inicial y final del lecho referentes al ensayo 15.

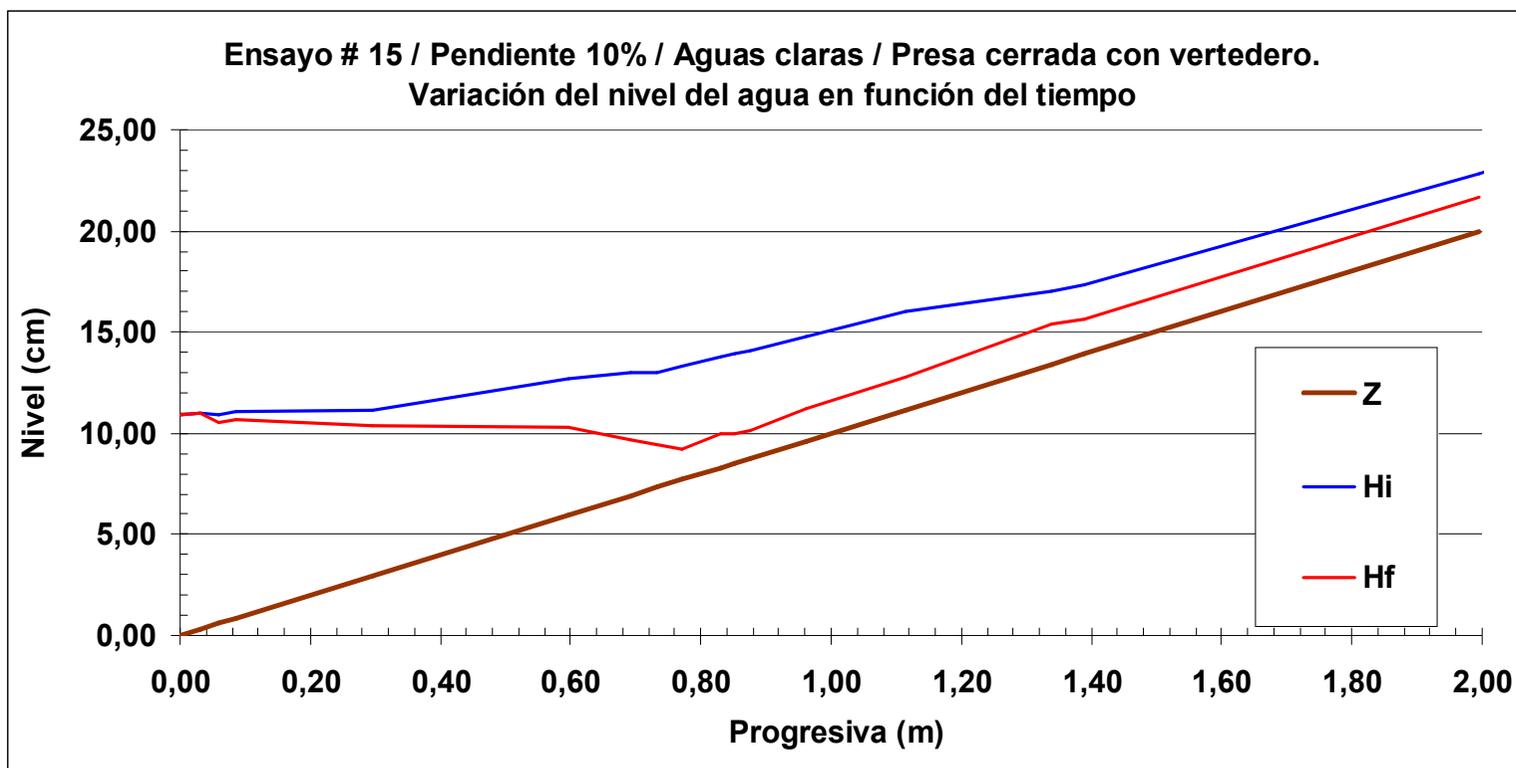


Figura 80. Perfiles de los niveles de agua referentes al ensayo 15, Se aprecia la variación en los niveles de los perfiles de agua inicial y final.

4.5. Comparación de perfiles medidos y perfiles calculados de la superficie inicial del agua

A fin de obtener los perfiles de agua inicial de manera teórica (matemáticamente simulados) para cada una de las pendientes utilizadas en los ensayos de los experimentos se tomaron los siguientes valores numéricos para los parámetros de entrada contentivos en el archivo de texto (Perfil*.DAT) y así de esta manera comparar con los valores medidos.

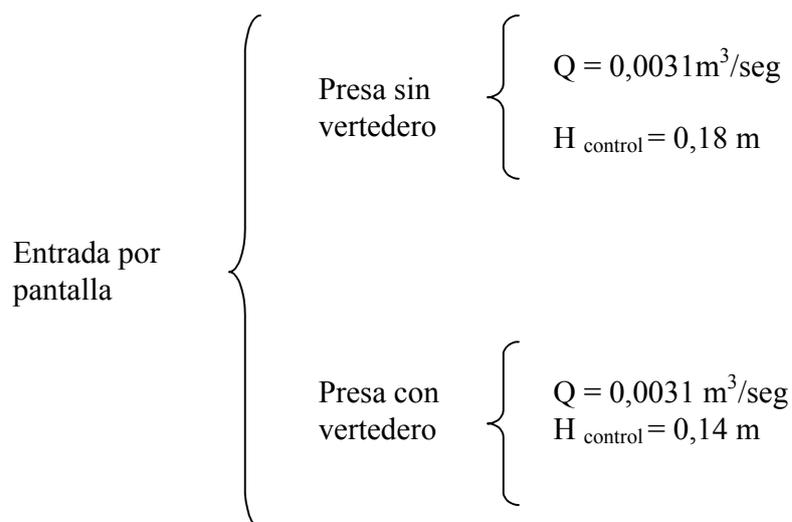
4.5.1. Pendiente 5%:

Datos de entrada:

- En el Archivo de texto a ser leído por el programa PERFIL, de acuerdo a la tabla 3:

```
8.483 43 200 0 1 0.001 1 1 1 -0.005 0
0.05
0
0.044033651
0.30
0
```

- Entrada de datos por pantalla:



4.5.1.1.1. Ensayo 1 con presa cerrada.

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 81.

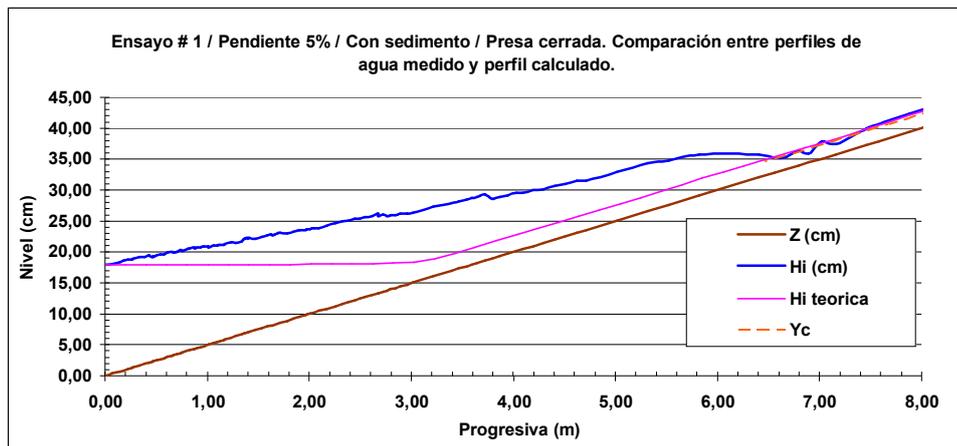


Figura 81. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 5% con presa cerrada. La línea azul: Perfil medido y la línea fucsia: Perfil calculado.

4.5.1.1.2. Ensayo 3 con presa con vertedero

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 82.

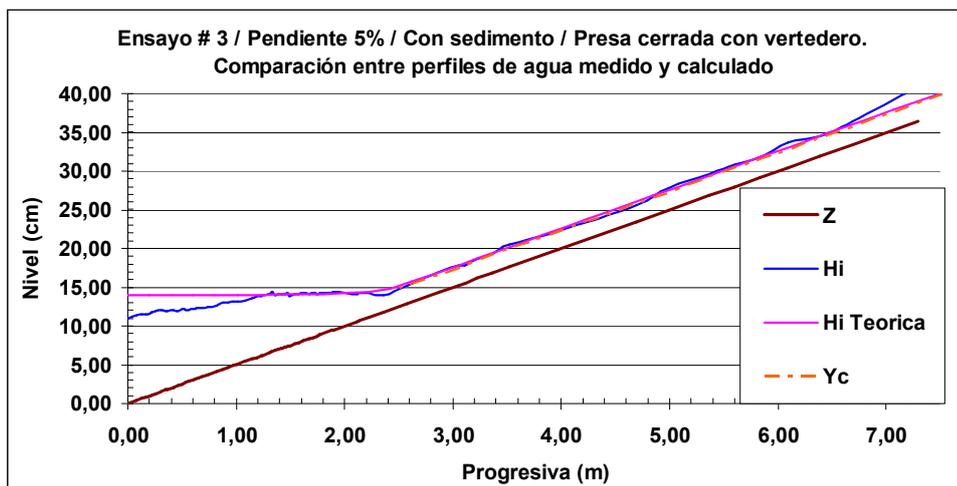


Figura 82. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 5% con presa cerrada. La línea azul: Perfil medido y la línea fucsia: Perfil calculado.

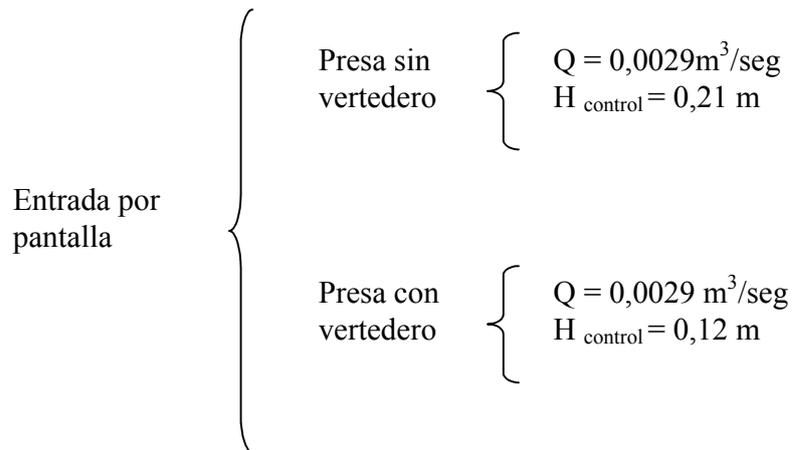
4.5.2. Pendiente 7.5%:

Datos de entrada:

- En el Archivo de texto a ser leído por el programa PERFIL, de acuerdo a la tabla 3:

8.483 43 200 0 1 0.001 1 1 1 -0.005 0
 0.075
 0
 0.032404057
 0.30
 0

- Entrada de datos por pantalla:



4.5.2.1.1. *Ensayo 5 con presa sin vertedero*

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 83.

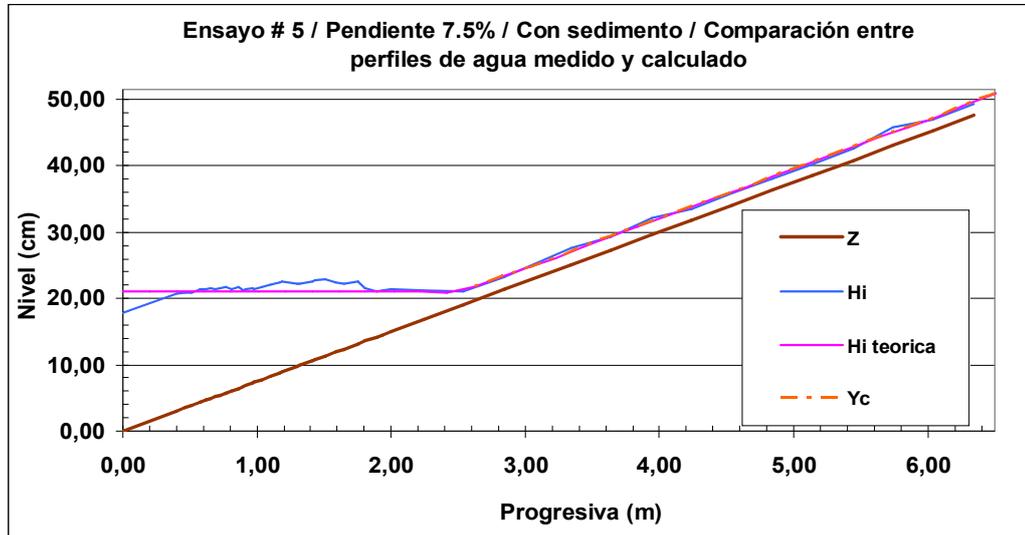


Figura 83. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 7.5% con presa cerrada. La línea azul: Perfil medido y la línea fucsia: Perfil calculado.

4.5.2.1.2. Ensayo 7 con presa con vertedero

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 84.

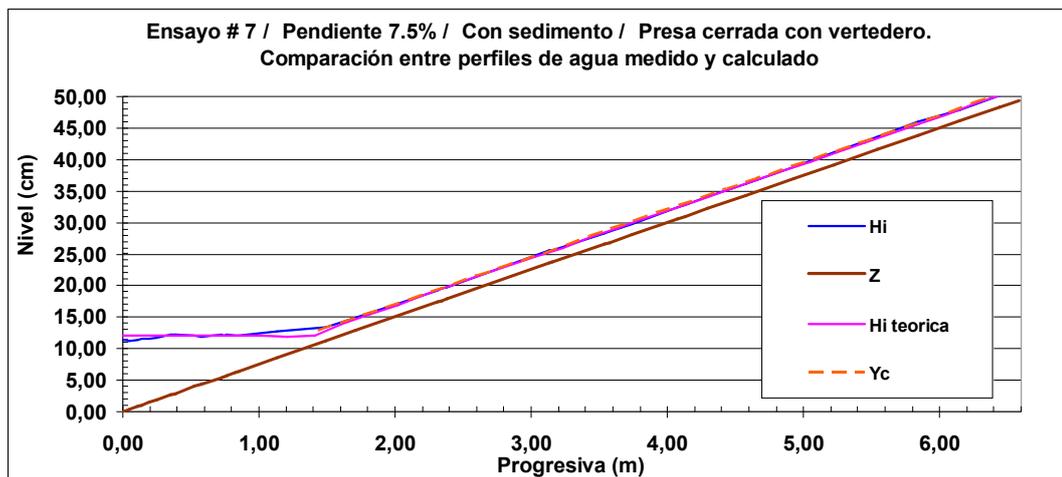


Figura 84. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 7.5% con presa cerrada. La línea azul: Perfil experimental y la línea fucsia: Perfil calculado.

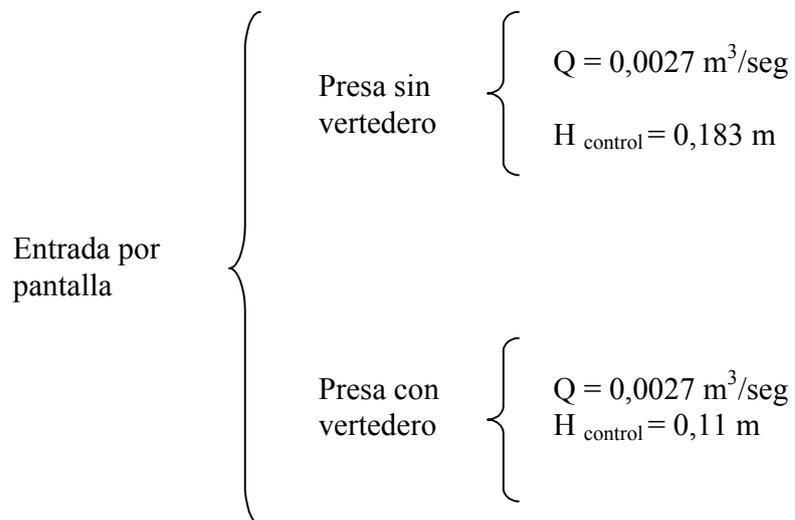
4.5.3. Pendiente 10%

Datos de entrada:

- En el Archivo de texto a ser leído por el programa PERFIL, de acuerdo a la tabla 3:

8.483 43 200 0 1 0.001 1 1 1 -0.005 0
 0.10
 0
 0.034497529
 0.30
 0

- Entrada de datos por pantalla:



4.5.3.1.1. *Ensayo 10 con presa sin vertedero*

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 85.

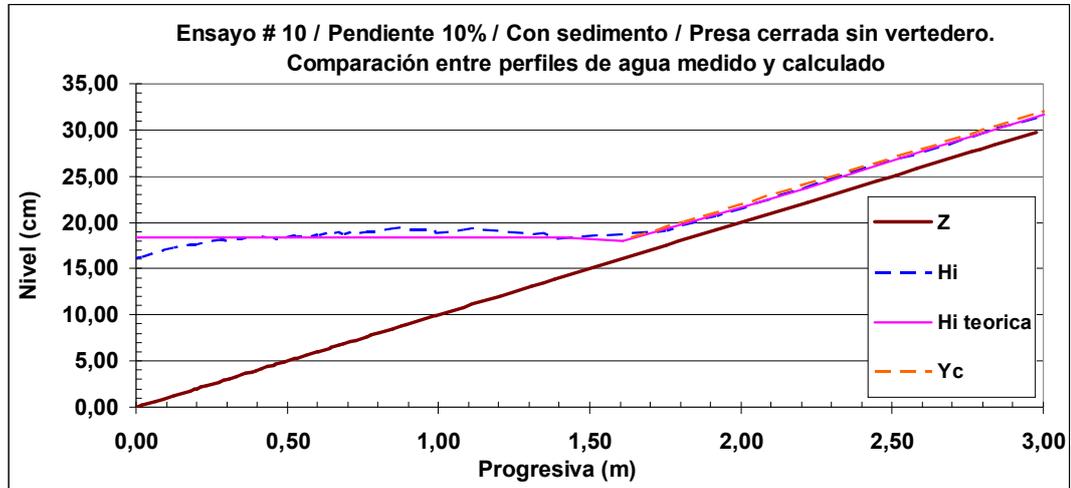


Figura 85. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 10% con presa cerrada. La línea azul: Perfil medido y la línea fucsia: Perfil calculado.

4.5.3.1.2. Ensayo 12 con presa con vertedero

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 86.

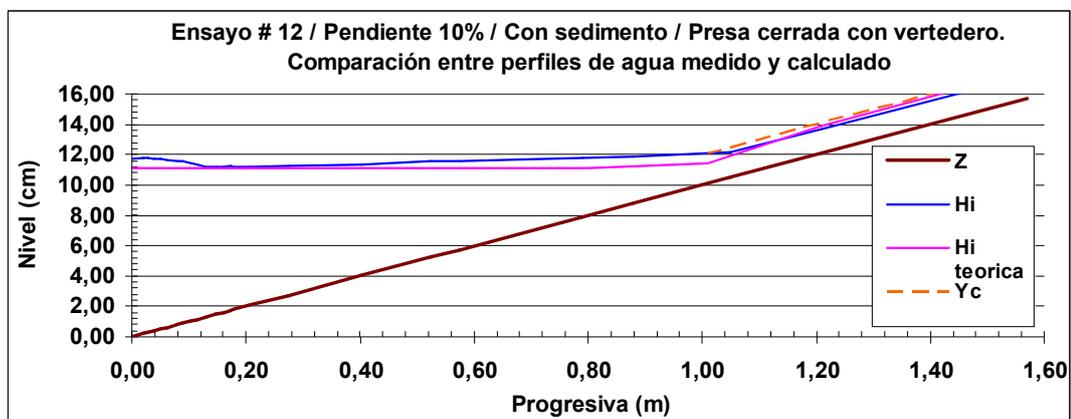


Figura 86. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 10% con presa cerrada. La línea azul: Perfil medido y la línea fucsia: Perfil calculado.

4.5.3.1.3. Ensayo 14 con presa con vertedero

Para este ensayo los resultados están presentados en la figura 87.

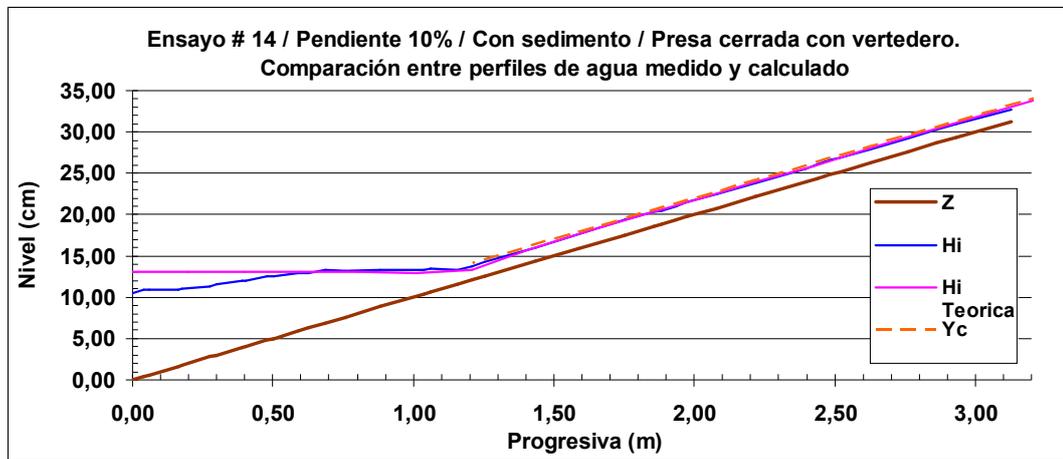


Figura 87. Perfiles de agua inicial para el ensayo de pendiente 7.5% con presa cerrada. La línea azul: Perfil experimental y la línea fucsia: Perfil calculado.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Perfiles del lecho sedimentado por efecto de la presa

5.1.1. Sedimentación por efecto de la presa

5.1.1.1. *Formación del lecho sedimentado*

A partir de las observaciones obtenidas se observó que la sedimentación de la arena vertida aguas arriba del canal se produce específicamente donde el flujo de agua sufre el cambio de régimen uniforme a gradualmente variado como efecto de la presa aguas abajo, específicamente donde comienza a generarse el remanso hidráulico o resalto hidráulico, de este punto en adelante la acumulación de sedimentos en el fondo del canal conforma el lecho sedimentado de una manera constante en su avance hasta la colmatación completa de la presa cerrada y de manera parcial para el caso de la presa con vertedero por causa de los vórtices presentes en las cercanías de la presa.

5.1.1.2. *Caudal sólido sedimentado y caudal unitario*

A partir de los resultados obtenidos se observó que no existe mucha dispersión entre los valores de caudal sólido sedimentado para los experimentos donde se vertió la arena a un balde por minuto ($4.76047 \times 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ o $0.002856284 \text{ m}^3/\text{min}$). Donde el caudal sólido en promedio es de $0.00244 \text{ m}^3/\text{min}$ con una desviación estándar de $0,0004179 \text{ m}^3/\text{min}$ y para el Caudal sólido unitario un promedio $0,00813 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$ con una desviación estándar de $0,001393 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$; respectivamente.

Para los casos en los cuales se vertió el doble de la carga de sedimento podemos apreciar que el caudal sólido sedimentado y el caudal sólido unitario tuvieron un incremento directamente proporcional, siendo el promedio del caudal sólido $0,00445 \text{ m}^3/\text{s}$ con una desviación estándar del $0,0000796 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el caudal sólido unitario un promedio de $0,01483 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$ con una desviación estándar de $0,0002651 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$. Respectivamente.

5.1.1.3. *Pendiente de compensación o equilibrio*

A partir de los resultados obtenidos se observa que para una carga de sedimento correspondiente a 1 balde por minuto ($4.76047 \times 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ o $0.002856284 \text{ m}^3/\text{min}$) tenemos que para las pendientes del canal se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para una Pendiente 5%

Se observó que la pendiente de compensación es aproximadamente 4%.

- Para una pendiente de 7,5%

Se observó que la pendiente de compensación es aproximadamente como se expone en la tabla 7

Q_s suministrado (m^3/s)	Pendiente de compensación (%)
$4,7605 \times 10^{-5}$	4,8
$9,5333 \times 10^{-5}$	5,2

Tabla 7. Pendiente de compensación obtenida para la pendiente de 7,5% para las diversas concentraciones de sedimento vertido en el canal de ensayo

- Para una pendiente de 10%

Se observó que la pendiente de compensación es aproximadamente como se expone en la tabla 8.

Q_s suministrado (m^3/s)	Pendiente de compensación (%)
$4,7605 \times 10^{-5}$	6,17
$9,5333 \times 10^{-5}$	7,38

Tabla 8. Pendiente de compensación obtenida para la pendiente de 10% para las diversas concentraciones de sedimento vertido en el canal de ensayo

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en conjunto con el calculo de la pendiente de compensación o equilibrio por la fórmula japonesa.

S_o (%)	Q_s (m^3/s)	S_e (%)	$2/3S_o$ (%)
5	$4,8 \times 10^{-5}$	4	3,3
7,5%	$4,8 \times 10^{-5}$	4,8	5
	$9,5 \times 10^{-5}$	5,2	
10%	$4,8 \times 10^{-5}$	6,2	6,6
	$9,5 \times 10^{-5}$	7,4	

Tabla 9. Pendientes de compensación o equilibrio obtenidos en los ensayos experimentales en conjunto con la obtenida por la fórmula japonesa

5.1.1.4. Angulo que forma el frente de onda del delta

De acuerdo a los valores obtenidos de la determinación de la pendiente del frente del lecho se observó que no hay mucha discrepancia; independientemente de la pendiente tomada o la carga de sedimentos vertida al canal su valor tiene un promedio de 32,29°.

5.1.1.5. Velocidad de propagación del delta

A partir de los resultados obtenidos del cálculo del desplazamiento del delta en función del tiempo en el canal de ensayo del laboratorio, presentados en la tabla 10 se observa:

- Para una pendiente de 5%

Se aprecia una gran discrepancia entre los resultados de velocidad de desplazamiento para el ensayo sin vertedero y con vertedero, los dos con la misma concentración de sedimentos.

- Para una pendiente de 7,5%

Se aprecia que la velocidad es aproximadamente la misma independiente de la concentración de sedimento vertido y el tipo de presa utilizado.

- Para una pendiente de 10%:

Se aprecia que la velocidad de propagación obtenida para los ensayos con vertedero son aproximadamente iguales, sin embargo se observó discrepancia con el ensayo con presa cerrada.

<i>Experimento N°</i>	<i>Velocidad de propagación de la onda (cm/s)</i>	<i>Condiciones para el experimento</i>
Ensayo 1	0,17	S ₀ : 5%, sin vertedero, conc. de sedimento: 4,76x10 ⁻⁵ m ³ /s
Ensayo 3	0,59	S ₀ : 5%, con vertedero, conc. de sedimento: 4,76x10 ⁻⁵ m ³ /s
Ensayo 5	0,44	S ₀ : 7,5%, sin vertedero,

		conc. de sedimento: $4,76 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Ensayo 7	0,44	S_0 : 7,5%, con vertedero, conc. de sedimento: $4,76 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Ensayo 9	0,45	S_0 : 7,5%, con vertedero, conc. de sedimento: $9,53 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Ensayo 10	0,21	S_0 : 10%, sin vertedero, conc. de sedimento: $4,76 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Ensayo 12	0,69	S_0 : 10%, con vertedero, conc. de sedimento: $4,76 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Ensayo 14	0,72	S_0 : 10%, con vertedero, conc. de sedimento: $9,53 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 10. Velocidad de propagación del delta obtenido para las pendientes 5%, 7,5%, 10% y para las diversas concentraciones de sedimento vertido en el canal de ensayo.

5.1.1.6. Granulometría

Los resultados obtenidos de las granulometrías realizadas a los lechos sedimentados mostraron un aumento en el tamaño del grano a medida que se aleja de la presa y un aumento del grano a medida que se profundiza en el perfil, con una inversión de este comportamiento en el tramo de transición de régimen del flujo o zona donde se genera el resalto hidráulico.

5.1.2. Degradación del lecho por acción del flujo con aguas claras

5.1.2.1. *Degradación del lecho sedimentado*

Tomando en cuenta las observaciones de la degradación del lecho en el canal para las diversas pendientes, se apreció que la misma se da desde aguas arriba de una forma constante hasta alcanzar el equilibrio, como lo evidencia la estimación del caudal sólido erosionado o degradado del lecho; igualmente es independiente de la carga de sedimentos o la inclinación de la pendiente que el resultado final es una cuña de sedimentos cuya arista coincide con el punto de formación del remanso o resalto hidráulico generado por la presa aguas abajo en el canal.

5.1.2.2. Caudal sólido sedimentado y caudal unitario.

A partir de los resultados obtenidos se observó que no existe mucha discrepancia entre los valores de caudal sólido erosionado para los experimentos donde se dejó correr aguas claras, para los cuales tenemos un promedio de $0.00206 \text{ m}^3/\text{min}$ y una desviación estándar de $0.00046 \text{ m}^3/\text{min}$ y para el caudal sólido unitario erosionado un promedio $0.00686 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$ y una desviación estándar de $0.00154 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$; respectivamente.

Para el caso en el cual se vertió el doble de la carga de sedimento podemos apreciar que el caudal sólido erosionado y el caudal sólido unitario erosionado presentó un incremento directamente proporcional, siendo el caudal sólido erosionado $0.00391 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal sólido unitario de $0.01302 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$; respectivamente.

5.1.2.3. Pendiente de compensación o equilibrio.

A partir de los resultados obtenidos se observó que la pendiente de compensación al dejar correr aguas claras sobre el lecho sedimentado es de aproximadamente 0%, es decir una pendiente horizontal.

5.1.2.4. Granulometría

Según la distribución granulométrica obtenida para aguas claras que se tomó, la variación a lo largo del canal y de la columna vertical (figura 77) manifestó un fenómeno inverso a las granulometrías realizadas a los lechos sedimentados, lo cual deja en evidencia una tendencia al acorazamiento del lecho.

5.2. Comparación de perfiles de agua inicial medidos y calculados mediante el programa “PERFIL”.

5.2.1. Pendiente de 5%

5.2.1.1. Ensayo 1. Presa cerrada

A partir de los datos obtenidos (ver figura 81) se aprecia una gran discrepancia entre el perfil medido y el perfil calculado con el programa. En tal sentido se presenta una foto en la figura 88 en la cual se aprecia el perfil medido como el acertado, además la sedimentación producto de la presa comienza a aproximadamente a los 6mts de la presa (punto donde ocurre el cambio de régimen del flujo).

En este análisis en particular no se encontró una explicación satisfactoria para la diferencia entre el perfil calculado y el medido experimentalmente.



Figura 88. Foto del ensayo 1 donde se ve claramente que el perfil M1 comienza a formarse aproximadamente a 6 metros de la presa.

5.2.1.2. *Ensayo 3. Presa con vertedero*

A partir de los datos obtenidos (figura 82) se aprecia una coherencia entre el perfil experimental y el simulado con el programa. La discrepancia que se aprecia entre los perfiles resultantes se atribuye al efecto local de la presa aguas debajo del canal.

5.2.2. Pendiente 7.5%

5.2.2.1. Ensayo 5. Presa sin vertedero

A partir de los datos obtenidos (figura 83), el razonamiento en cuanto a los resultados son similares a los presentados para el ensayo 3.

5.2.2.2. Ensayo 7. Presa con vertedero

A partir de los datos obtenidos (figura 84), el razonamiento en cuanto a los resultados son similares a los presentados para el ensayo 3.

5.2.3. Pendiente 10%

5.2.3.1. Ensayo 10. Presa sin vertedero

A partir de los datos obtenidos (figura 85), el razonamiento en cuanto a los resultados son similares a los presentados para el ensayo 3.

5.2.3.2. Ensayo 12. Presa con vertedero

A partir de los datos obtenidos (figura 86), el razonamiento en cuanto a los resultados son similares a los presentados para el ensayo 3.

5.2.3.3. Ensayo 14. Presa con vertedero

A partir de los datos obtenidos (figura 87), el razonamiento en cuanto a los resultados son similares a los presentados para el ensayo 3.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Primeramente expondremos ¿Por qué se alcanza el equilibrio en los ensayos realizados en el canal experimental?

Para los casos en los que se suministró sedimento (ver figura 89):

1. Q_s de suministro debe ser igual a Q_s en todas las secciones e igual a Q_s de salida.
2. Las profundidades y velocidades son aproximadamente iguales en el tramo I y II, debido a que la reducción de la pendiente del lecho se compensa con una reducción en la fricción del canal cuando el flujo pasa del tramo I al tramo II.

Para los casos en los que se dejó correr aguas claras (ver figura 90):

1. Q_s en todas las secciones igual a Q_s de salida igual a cero.
2. Las profundidades y velocidades son aproximadamente iguales en el tramo I y II, debido a que la reducción en la pendiente del lecho se compensa con una reducción en la fricción del canal cuando el flujo pasa del tramo I al tramo II.

Y por lo tanto se considera que se ha alcanzado el equilibrio

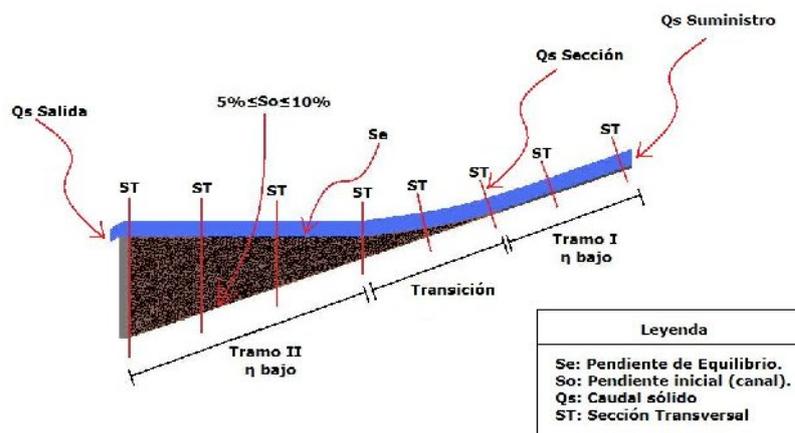


Figura 89. Esquema de la condición de equilibrio en el canal con suministro de sedimentos.

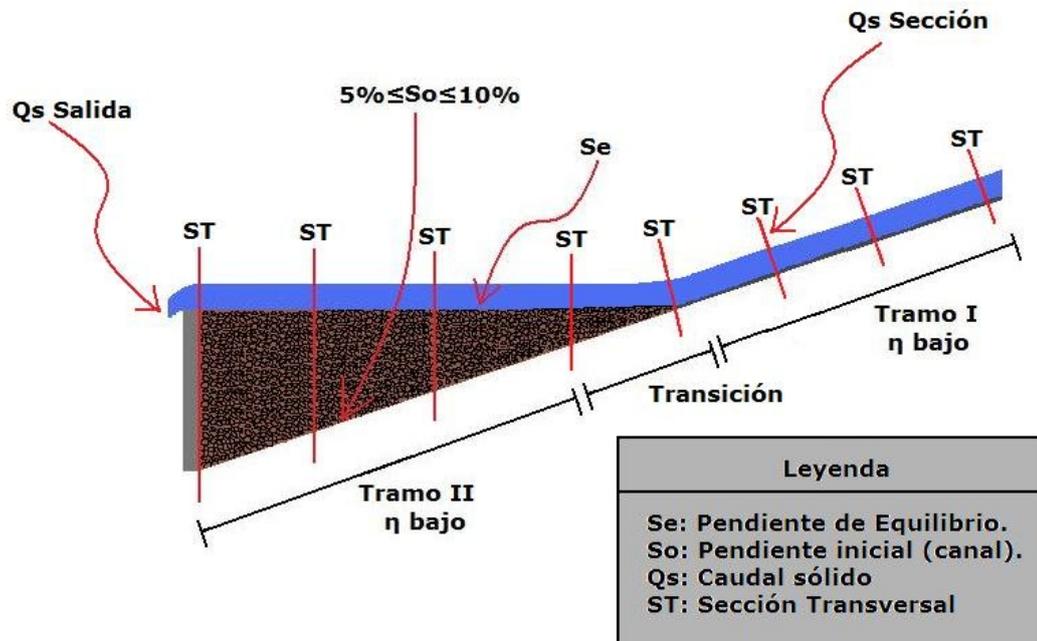


Figura 90. Esquema de la condición de equilibrio en el canal. Aguas claras.

De acuerdo a los análisis efectuados a los resultados se puede concluir que:

1. La sedimentación en el canal por efecto de la presa comienza a darse específicamente en donde el régimen de flujo cambia de uniforme a gradualmente variado, esto debido a la disminución del campo de velocidades en el flujo con la altura del tirante de agua, lo cual reduce la capacidad de transporte del flujo. Este comportamiento es independientemente de la concentración de sedimentos utilizada o la pendiente del canal.
2. El delta de sedimentos comienza a viajar aguas abajo y a crecer verticalmente desplazándose también aguas arriba. Se forma un frente de onda que avanza progresivamente en el embalse creado por el remanso de la presa. Simultáneamente los depósitos sedimentarios incrementan los niveles de la superficie del agua y el remanso aguas arriba, induciendo a una mayor sedimentación en el canal de aproximación.
3. El avance de la onda de sedimentos (delta) ocurre de manera constante como lo demuestran las observaciones visuales, gráficos de variación espacial y temporal presentados anteriormente y las estimaciones del caudal sólido sedimentado en el

fondo del canal. En términos generales, el delta se mueve más rápidamente en los casos de presas con vertedero debido a la aceleración del flujo producido por dicha vertedero. La celeridad del delta varió entre 0,17 cm/s y 0,71 cm/s. Para los casos ensayados cabe destacar que las variaciones que se dan en las observaciones y resultados obtenidos son atribuidos a las pequeñas variaciones del caudal suministrado por las bombas y la imprecisión al momento de levantar a información del canal.

4. S_e varía con el aporte de sedimentos o caudal sólido suministrado aguas arriba del canal, cuando se duplica el aporte de sedimentos al canal, la pendiente de equilibrio se incrementa en un 8% para el caso de $S_o = 7,5\%$ y se incrementa en un 20% para el caso de $S_o = 10\%$
5. Para los ensayos con las pendientes 7,5% y 10%, el valor de la pendiente de equilibrio es aproximadamente igual al valor empírico dado por la fórmula japonesa $S_e = \frac{2}{3} S_o$. Para la pendiente de 5%, el valor de S_e es aproximadamente igual a $\frac{4}{5} S_o$.
6. Los resultados obtenidos en las distribuciones granulométricas para los diversos lechos sedimentados se deben a que no se encuentran acorazados y en el caso contrario (aguas claras) la distribución granulométrica presenta una distribución completamente inversa a lo largo del lecho existiendo una tendencia al acorazamiento del fondo, premisa necesaria para obtener el equilibrio.
7. Según las observaciones realizadas para las presas con vertedero, se concluye que éstas no se colmataron totalmente debido a los vórtices y turbulencias generados en las cercanías de la presa.
8. Según las observaciones realizadas se llegó a la conclusión que la disminución repentina que sufre el tirante de agua en las cercanías de la presa totalmente cerrada, es debido a que el flujo cambia su condición de flujo con vertedero a uno del tipo flujo con escalón hacia abajo.
9. Para los resultados obtenidos en los ensayos donde se vertió sedimento, el ángulo que forma con respecto a la horizontal el frente del delta es aproximadamente $32,29^\circ$, independientemente de la concentración de sedimentos, de la pendiente o el tipo de presa.
10. Los resultados y observaciones obtenidos para los ensayos donde se dejó correr aguas claras indican que el avance de la onda de degradación o erosión es

aproximadamente constante desde aguas arriba de la presa hasta alcanzar una pendiente de equilibrio en aproximadamente 0%. Cabe destacar que las discrepancias en el caudal sólido erosionado para los diversos intervalos de tiempo, son atribuidos a las pequeñas variaciones de caudal por causa de las bombas utilizadas.

11. Los perfiles de la superficie del agua calculados por el modelo matemático coinciden bastante bien con los perfiles medidos, excepto en el caso del ensayo #1 en donde no se consiguió una explicación satisfactoria para esa discrepancia.
12. Para finalizar se concluye que la fórmula de transporte de Engelund-Hansen, es aplicable para este tipo de ensayos, en los cuales se vierte caudal sólido no cohesivo (arenas)

6.2. RECOMENDACIONES

1. Este estudio debe extenderse para otros tipos de presas de retención de sedimentos tomando en cuenta pendientes más suaves, más pronunciadas y variando las concentraciones de sedimento que las tomadas en cuenta en este trabajo.
2. Realizar estudios de campo en diversas cuencas en el Estado Vargas que presenten este tipo de presas de retención de sedimentos a fin de establecer relaciones entre los resultados de esta investigación y los obtenidos en las cuencas reales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. CHOW, Ven Te, Hidráulica de Canales Abiertos, McGraw Hill Interamericana S.A., Impreso por Editorial Nomos S.A., Colombia, diciembre de 2000.
2. GONZALEZ S. Marcelo y CORDOVA José R., Estimación de hidrogramas de crecidas extremas
3. GONZALEZ S. Marcelo y CORDOVA José R., Estimación De Hidrogramas de Crecidas En Cuencas del Litoral Central Luego de Los Aludes Torrenciales de Diciembre De 1999. Acta Científica Venezolana, Vol. 54, Suplemento No. 1: 63–87, 2003
4. LOPEZ S. José Luís. CALCULO DE PERFILES DE AGUA EN CANALES ABIERTOS. Guía de Estudio. Instituto de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería, UCV. Caracas, Venezuela, Marzo, 1998.
5. LOPEZ José L. PEREZ H. David, PEÑARANDA Caudex V. Presas para el Control de Flujos Torrenciales en el Estado Vargas, Venezuela, Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos Córdoba, República Argentina - 7, 8 y 9 de Noviembre de 2007.
6. LOPEZ S. José L. GARCIA M. Reinaldo, Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999 en Venezuela, Memorias del Seminario Internacional, “Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999 en Venezuela” Editores José Luis López Sánchez y Reinaldo García Martínez, Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Impresión de Editorial Gráficas Lauki, Primera Edición, Caracas, Venezuela, diciembre de 2006.
7. LOPEZ S. José Luís. SOFTWARE DE APOYO DOCENTE A LA ASIGNATURA “FLUJO CON SUPERFICIE LIBRE”. Conjunto de Programas de Computación. Instituto de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería, UCV. Caracas, Venezuela, Marzo, 1998.
8. SARDI S. Víctor A., Inundaciones del Litoral Central de Venezuela–Escala de Magnitudes, en: Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999 en Venezuela, Memorias del Seminario Internacional, “Los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999 en Venezuela” Editores José Luis López Sánchez y Reinaldo García Martínez, Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Impresión de Editorial Gráficas Lauki, Primera Edición, Caracas, Venezuela, diciembre de 2006.

9. SUAREZ V. Luís M., Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos, República de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales renovables MARN, primera edición, mayo de 1993.
10. U.S. Geological Survey. Summary and Use of Selected Fluvial Sediment-Discharge Formulas. 1989.
11. VIDE Martín. Juan P. Ingeniería de Ríos, Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, Barcelona, España, 2002.

ANEXO ENSAYO 1.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	H 00:18:30 (cm)	H 00:32:00 (cm)	Hf (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:05:30 (cm)	F 00:06:30 (cm)	F 00:07:30 (cm)
8,48	42,42	45,62			49,32				
8,18	40,92	43,92			47,82				
7,88	39,42	42,32			46,32				
7,58	37,92	40,62			45,72				
7,46	37,32	39,92		43,42	45,22				
7,16	35,82	37,42		42,12	43,82				
7,02	35,12	37,82		41,12	43,22				
6,89	34,47	35,87		40,87	42,57				
6,79	33,97	36,37		40,87	41,97				
6,67	33,34	35,34	38,24	41,44	42,34				
6,56	32,79	35,19	38,59	40,99	42,19				
6,41	32,04	35,74	38,94	40,64	42,44				
5,82	29,09	35,69	37,29	39,29	39,89				
5,52	27,59	34,79	35,89	37,69	38,49	27,59	27,59	27,59	27,59
5,32	26,59	34,29	35,29	36,89	37,69	27,80	27,80	27,80	27,80
5,02	25,09	32,99	33,99	35,49	36,59	27,00	27,00	27,00	27,00
4,72	23,59	31,49	32,49	33,99	35,09	26,85	26,85	26,85	26,85
4,62	23,10	31,50	32,30	33,90	34,70	26,60	26,60	26,60	26,60
4,51	22,57	30,97	31,77	33,37	34,17	22,57	26,47	26,47	26,47
4,41	22,05	30,75	31,45	32,95	33,65		26,15	26,15	26,15
4,29	21,47	30,17	30,87	32,37	33,07		21,47	26,00	25,87
4,19	20,95	30,05	30,45	31,85	32,85			25,75	25,75
4,09	20,46	29,56	29,96	31,36	32,36			20,46	25,66
4,03	20,17	29,57	29,97	31,47	32,27				25,57
3,94	19,72	29,12	29,52	31,02	31,82				19,72

Prog (m)	Z (cm)	F 00:09:30 (cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30 (cm)	F 00:12:30 (cm)	F 00:13:30 (cm)	F 00:14:30 (cm)	F 00:15:30 (cm)
8,48	42,42							
8,18	40,92							
7,88	39,42							
7,58	37,92							
7,46	37,32							
7,16	35,82							
7,02	35,12							
6,89	34,47							
6,79	33,97							
6,67	33,34							
6,56	32,79							
6,41	32,04							
5,82	29,09							
5,52	27,59	27,59	27,59	27,59	27,59	29,99	29,99	29,99
5,32	26,59	27,80	27,80	27,80	27,80	30,19	30,19	30,19
5,02	25,09	27,00	27,00	27,00	27,00	29,69	29,69	29,69
4,72	23,59	26,85	26,85	26,85	26,85	28,89	28,89	28,89
4,62	23,10	26,60	26,60	26,60	26,60	28,70	28,70	28,70
4,51	22,57	26,47	26,47	26,47	26,47	28,17	28,17	28,17
4,41	22,05	26,15	26,15	26,15	26,15	27,85	27,85	27,85
4,29	21,47	25,87	25,87	25,87	25,87	27,27	27,27	27,27
4,19	20,95	25,75	25,75	25,75	25,75	27,25	27,00	27,25
4,09	20,46	25,66	25,66	25,66	25,66	26,76	26,76	26,76
4,03	20,17	25,57	25,57	25,57	25,57	26,67	26,40	26,67
3,94	19,72	25,42	25,42	25,42	25,42	26,22	26,22	26,22

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	H 00:18:30 (cm)	H 00:32:00 (cm)	Hf (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:05:30 (cm)	F 00:06:30 (cm)
3,87	19,35	28,95	29,25	30,65	31,65			
3,79	18,95	28,55	28,85	30,25	31,35			
3,72	18,59	29,29	30,29	30,29	31,29			
3,64	18,22	28,92	29,92	29,92	30,92			
3,60	17,98	28,78	29,78	29,78	30,78			
3,54	17,69	28,49	29,49	29,49	30,49			
3,46	17,32	28,22	29,02	29,02	30,22			
3,39	16,97	27,87	28,67	28,67	29,87			
3,22	16,10	27,30	27,80	27,80	29,10			
3,02	15,10	26,30	26,80	26,80	28,10			
2,96	14,78	26,28	26,38	26,38	27,88			
2,96	14,78	26,28	26,38	26,38	27,88			
2,89	14,46	26,16	26,16	26,16	27,46			
2,84	14,22	25,92	25,92	25,92	27,22			
2,79	13,97	25,97	25,97	25,97	27,37			
2,76	13,81	25,81	25,81	25,81	27,21			
2,73	13,63	26,03	25,93	25,93	27,03			
2,67	13,36	25,76	25,66	25,66	26,76			
2,67	13,36	26,16	25,86	25,86	26,96			
2,61	13,06	25,86	25,56	25,56	26,66			
2,55	12,74	25,64	25,34	25,34	26,44			
2,49	12,47	25,37	25,07	25,07	26,17			
2,44	12,22	25,32	24,82	24,82	25,92			
2,39	11,93	25,03	24,53	24,53	25,63			
2,32	11,62	25,02	24,22	24,22	25,32			

Prog (m)	Z (cm)	F 00:07:30 (cm)	F 00:08:30 (cm)	F 00:09:30 (cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30 (cm)	F 00:12:30 (cm)	F 00:13:30 (cm)
3,87	19,35		25,25	25,25	25,25	25,25	25,25	26,05
3,79	18,95		18,95	25,15	25,15	25,15	25,15	25,65
3,72	18,59			24,99	24,99	24,99	24,99	25,49
3,64	18,22			18,22	24,82	24,82	24,82	25,12
3,60	17,98				24,68	24,68	24,68	25,18
3,54	17,69				17,69	24,70	24,59	24,89
3,46	17,32					24,52	24,52	24,52
3,39	16,97					16,97	24,27	24,17
3,22	16,10						23,70	23,70
3,02	15,10						15,10	23,20
2,96	14,78							23,28
2,96	14,78							23,28
2,89	14,46							14,46
2,84	14,22							
2,79	13,97							
2,76	13,81							
2,73	13,63							
2,67	13,36							
2,67	13,36							
2,61	13,06							
2,55	12,74							
2,49	12,47							
2,44	12,22							
2,39	11,93							
2,32	11,62							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:14:30 (cm)	F 00:15:30 (cm)	F 00:16:30 (cm)	F 00:17:30 (cm)	F 00:18:30 (cm)	F 00:19:30 (cm)	F 00:20:30 (cm)
3,87	19,35	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22
3,79	18,95	26,05	26,05	26,05	26,05	26,05	26,05	26,05
3,72	18,59	25,65	25,65	25,65	25,65	25,65	25,65	25,65
3,64	18,22	25,49	25,49	25,49	25,49	25,49	25,49	25,49
3,60	17,98	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12
3,54	17,69	25,18	25,18	25,18	25,18	25,18	25,18	25,18
3,46	17,32	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89
3,39	16,97	24,52	24,52	24,52	24,52	24,52	24,52	24,52
3,22	16,10	24,17	24,17	24,17	24,17	24,17	24,17	24,17
3,02	15,10	24,00	23,70	23,70	23,70	23,70	24,00	24,00
2,96	14,78	23,00	23,10	23,10	23,10	23,10	23,10	23,10
2,96	14,78	23,00	23,28	23,28	23,28	23,28	23,28	23,28
2,89	14,46	22,58	23,28	23,28	23,28	23,28	23,28	23,28
2,84	14,22	22,26	22,96	23,06	23,06	23,06	23,06	23,06
2,79	13,97	22,02	22,72	22,82	22,82	22,82	22,82	22,82
2,76	13,81	13,97	22,47	22,57	22,57	22,57	22,57	22,57
2,73	13,63		22,31	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41
2,67	13,36		13,63	22,33	22,40	22,33	22,33	22,33
2,67	13,36			22,16	22,20	22,16	22,16	22,16
2,61	13,06			22,16	22,30	22,16	22,16	22,16
2,55	12,74			13,06	22,30	21,86	21,86	21,86
2,49	12,47				22,00	21,64	21,64	21,64
2,44	12,22				21,90	21,60	21,57	21,57
2,39	11,93				21,62	21,62	21,62	21,62
2,32	11,62				11,93	21,33	21,43	21,43

Prog (m)	Z (cm)	F 00:49:30 (cm)	F 00:50:30 (cm)	F 00:51:30 (cm)	F 00:52:30 (cm)
3,94	19,72	30,32	30,32	30,32	30,32
3,87	19,35	29,95	29,95	29,95	29,95
3,79	18,95	29,75	29,75	29,75	29,75
3,72	18,59	29,39	29,39	29,39	29,39
3,64	18,22	29,12	29,12	29,12	29,12
3,60	17,98	28,88	28,88	28,88	28,88
3,54	17,69	28,99	28,99	28,99	28,99
3,46	17,32	28,62	28,62	28,62	28,62
3,39	16,97	28,17	28,17	28,17	28,17
3,22	16,10	27,30	27,30	27,30	27,30
3,02	15,10	26,70	26,70	26,70	26,70
2,96	14,78	26,38	26,38	26,38	26,38
2,96	14,78	26,38	26,38	26,38	26,38
2,89	14,46	26,16	26,16	26,16	26,16
2,84	14,22	25,92	25,92	25,92	25,92
2,79	13,97	25,57	25,57	25,57	25,57
2,76	13,81	25,41	25,41	25,41	25,41
2,73	13,63	25,43	25,43	25,43	25,43
2,67	13,36	25,16	25,16	25,16	25,16
2,67	13,36	25,16	25,16	25,16	25,16
2,61	13,06	24,96	24,96	24,96	24,96
2,55	12,74	24,64	24,64	24,64	24,64
2,49	12,47	24,37	24,37	24,37	24,37
2,44	12,22	24,12	24,12	24,12	24,12
2,39	11,93	24,03	24,03	24,03	24,03
2,32	11,62	23,72	23,72	23,72	23,72

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	H 00:18:30 (cm)	H 00:32:00 (cm)	Hf (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:05:30 (cm)	F 00:06:30 (cm)
2,25	11,26	24,66	23,86	23,86	24,96			
2,17	10,86	24,26	23,66	23,66	24,36			
2,10	10,48	23,88	23,28	23,28	23,98			
2,05	10,24	23,84	23,24	23,24	24,14			
2,01	10,03	23,63	23,03	23,03	23,93			
1,98	9,92	23,72	22,82	22,82	23,82			
1,96	9,81	23,61	22,71	22,71	23,71			
1,90	9,51	23,61	23,01	23,01	23,51			
1,90	9,51	23,61	23,01	23,01	23,51			
1,84	9,20	23,30	22,70	22,70	23,20			
1,78	8,90	23,00	22,40	22,40	22,90			
1,72	8,59	23,19	21,99	21,99	22,89			
1,69	8,46	23,06	21,86	21,86	22,76			
1,66	8,31	22,91	22,21	22,21	22,71			
1,64	8,18	22,78	22,08	22,08	22,58			
1,62	8,11	22,91	22,91	22,91	22,61			
1,59	7,94	22,74	22,74	22,74	22,44			
1,54	7,69	22,49	22,49	22,49	22,19			
1,47	7,36	22,16	22,16	22,16	21,86			
1,42	7,09	22,29	22,29	22,29	21,89			
1,40	7,00	22,20	22,20	22,20	21,80			
1,40	7,00	22,30	22,30	22,30	21,50			
1,37	6,83	22,13	22,13	22,13	21,33			
1,37	6,83	22,13	22,13	22,13	21,33			
1,34	6,68	21,78	21,78	21,78	21,28			

Prog (m)	Z (cm)	F 00:07:30 (cm)	F 00:08:30 (cm)	F 00:09:30 (cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30 (cm)	F 00:12:30 (cm)	F 00:07:30 (cm)
2,25	11,26							
2,17	10,86							
2,10	10,48							
2,05	10,24							
2,01	10,03							
1,98	9,92							
1,96	9,81							
1,90	9,51							
1,90	9,51							
1,84	9,20							
1,78	8,90							
1,72	8,59							
1,69	8,46							
1,66	8,31							
1,64	8,18							
1,62	8,11							
1,59	7,94							
1,54	7,69							
1,47	7,36							
1,42	7,09							
1,40	7,00							
1,40	7,00							
1,37	6,83							
1,37	6,83							
1,34	6,68							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:13:30 (cm)	F 00:14:30 (cm)	F 00:15:30 (cm)	F 00:16:30 (cm)	F 00:17:30 (cm)	F 00:18:30 (cm)	F 00:19:30 (cm)
2,25	11,26						11,26	20,96
2,17	10,86							20,86
2,10	10,48							10,48
2,05	10,24							
2,01	10,03							
1,98	9,92							
1,96	9,81							
1,90	9,51							
1,90	9,51							
1,84	9,20							
1,78	8,90							
1,72	8,59							
1,69	8,46							
1,66	8,31							
1,64	8,18							
1,62	8,11							
1,59	7,94							
1,54	7,69							
1,47	7,36							
1,42	7,09							
1,40	7,00							
1,40	7,00							
1,37	6,83							
1,37	6,83							
1,34	6,68							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:20:30 (cm)	F 00:21:30 (cm)	F 00:22:30 (cm)	F 00:23:30 (cm)	F 00:24:30 (cm)	F 00:25:30 (cm)	F 00:26:30 (cm)
2,25	11,26	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96
2,17	10,86	20,76	20,76	20,76	20,76	20,86	20,86	20,86
2,10	10,48	20,48	20,48	20,48	20,48	20,48	20,48	20,48
2,05	10,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24
2,01	10,03	10,03	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13
1,98	9,92		20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12
1,96	9,81		9,81	20,21	20,31	20,31	20,31	20,31
1,90	9,51			20,11	20,11	20,11	20,11	20,11
1,90	9,51			20,11	19,71	20,11	20,11	20,11
1,84	9,20			9,20	19,40	19,80	19,80	19,80
1,78	8,90				19,10	19,50	19,50	19,50
1,72	8,59				8,59	19,19	19,19	19,19
1,69	8,46					19,16	19,16	19,16
1,66	8,31					8,31	19,01	19,01
1,64	8,18						18,98	18,98
1,62	8,11						8,11	18,91
1,59	7,94							18,84
1,54	7,69							7,69
1,47	7,36							
1,42	7,09							
1,40	7,00							
1,40	7,00							
1,37	6,83							
1,37	6,83							
1,34	6,68							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:27:30 (cm)	F 00:28:30 (cm)	F 00:29:30 (cm)	F 00:30:30 (cm)	F 00:31:30 (cm)	F 00:32:30 (cm)	F 00:33:30 (cm)
2,25	11,26	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96
2,17	10,86	20,86	20,86	20,86	20,86	20,86	20,86	20,86
2,10	10,48	20,48	20,48	20,48	20,48	20,48	20,48	20,48
2,05	10,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24	20,24
2,01	10,03	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13
1,98	9,92	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12
1,96	9,81	20,31	20,31	20,31	20,31	20,31	20,31	20,31
1,90	9,51	20,11	20,11	20,11	20,11	20,11	20,11	20,11
1,90	9,51	20,11	20,11	20,11	20,11	20,11	20,11	20,11
1,84	9,20	19,80	19,80	19,80	19,80	19,80	19,80	19,80
1,78	8,90	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50
1,72	8,59	19,19	19,19	19,19	19,19	19,19	19,19	19,19
1,69	8,46	19,16	19,16	19,16	19,16	19,16	19,16	19,16
1,66	8,31	19,01	19,01	19,01	19,01	19,01	19,01	19,01
1,64	8,18	18,98	18,98	18,98	18,98	18,98	18,98	18,98
1,62	8,11	18,91	18,91	18,91	18,91	19,11	19,11	19,21
1,59	7,94	18,84	18,84	18,84	18,84	19,14	19,14	19,14
1,54	7,69	18,59	18,59	18,59	18,89	19,19	19,19	19,19
1,47	7,36	18,66	18,66	18,66	18,66	18,96	18,96	18,96
1,42	7,09	7,09	18,59	18,59	18,59	18,89	18,89	18,89
1,40	7,00		18,50	18,50	18,50	18,80	18,80	18,80
1,40	7,00		18,50	18,20	18,50	18,80	18,80	18,80
1,37	6,83		6,83	18,03	18,53	18,73	18,73	18,73
1,37	6,83			18,03	18,53	18,73	18,73	18,73
1,34	6,68			17,88	18,58	18,68	18,68	18,68

Prog (m)	Z (cm)	F 00:34:30 (cm)	F 00:35:30 (cm)	F 00:36:30 (cm)	F 00:37:30 (cm)	F 00:38:30 (cm)	F 00:39:30 (cm)	F 00:40:30 (cm)
2,25	11,26	20,96	20,96	23,36	23,36	23,36	23,36	23,36
2,17	10,86	20,86	20,86	22,96	22,96	22,96	22,96	22,96
2,10	10,48	20,48	20,48	22,68	22,68	22,68	22,68	22,68
2,05	10,24	20,24	20,24	22,44	22,44	22,44	22,44	22,44
2,01	10,03	20,13	20,13	22,23	22,23	22,23	22,23	22,23
1,98	9,92	20,12	20,12	22,12	22,12	22,12	22,12	22,12
1,96	9,81	20,31	20,31	22,11	22,11	22,11	22,11	22,11
1,90	9,51	20,11	20,11	21,81	21,81	21,81	21,81	21,81
1,90	9,51	20,11	20,11	21,81	21,81	21,81	21,81	21,81
1,84	9,20	19,80	19,80	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50
1,78	8,90	19,50	19,50	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20
1,72	8,59	19,19	19,19	20,99	20,99	20,99	20,99	20,99
1,69	8,46	19,16	19,16	20,86	20,86	20,86	20,86	20,86
1,66	8,31	19,01	19,01	20,71	20,71	20,71	20,71	20,71
1,64	8,18	18,98	18,98	20,58	20,58	20,58	20,58	20,58
1,62	8,11	19,21	19,21	20,51	20,51	20,51	20,51	20,51
1,59	7,94	19,14	19,14	20,34	20,34	20,34	20,34	20,34
1,54	7,69	19,19	19,19	20,29	20,29	20,29	20,29	20,29
1,47	7,36	18,96	18,96	19,96	19,96	19,96	19,96	19,96
1,42	7,09	18,89	18,89	19,79	19,79	19,79	19,79	19,79
1,40	7,00	18,80	18,80	19,70	19,70	19,70	19,70	19,70
1,40	7,00	18,80	18,80	19,70	19,70	19,70	19,70	19,70
1,37	6,83	18,73	18,73	19,73	19,73	19,73	19,73	19,73
1,37	6,83	18,73	18,73	19,73	19,73	19,73	19,73	19,73
1,34	6,68	18,68	18,68	19,58	19,58	19,58	19,58	19,58

Prog (m)	Z (cm)	F 00:48:30 (cm)	F 00:49:30 (cm)	F 00:50:30 (cm)	F 00:51:30 (cm)
2,25	11,26	23,36	23,36	23,36	23,36
2,17	10,86	22,96	22,96	22,96	22,96
2,10		22,68	22,68	22,68	22,68
2,05	10,24	22,44	22,44	22,44	22,44
2,01	10,03	22,23	22,23	22,23	22,23
1,98	9,92	22,12	22,12	22,12	22,12
1,96	9,81	22,11	22,11	22,11	22,11
1,90	9,51	21,81	21,81	21,81	21,81
1,90	9,51	21,81	21,81	21,81	21,81
1,84	9,20	21,50	21,50	21,50	21,50
1,78	8,90	21,20	21,20	21,20	21,20
1,72	8,59	20,99	20,99	20,99	20,99
1,69	8,46	20,86	20,86	20,86	20,86
1,66	8,31	20,71	20,71	20,71	20,71
1,64	8,18	20,58	20,58	20,58	20,58
1,62	8,11	20,51	20,51	20,51	20,51
1,59	7,94	20,34	20,34	20,34	20,34
1,54	7,69	20,29	20,29	20,29	20,29
1,47	7,36	19,96	19,96	19,96	19,96
1,42	7,09	19,79	19,79	19,79	19,79
1,40	7,00	19,70	19,70	19,70	19,70
1,40	7,00	19,70	19,70	19,70	19,70
1,37	6,83	19,73	19,73	19,73	19,73
1,37	6,83	19,73	19,73	19,73	19,73
1,34	6,68	19,58	19,58	19,58	19,58

Prog (m)	Z (cm)	H 00:32:00 (cm)	Hf (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:05:30 (cm)	F 00:06:30 (cm)	F 00:07:30 (cm)	F 00:08:30 (cm)
1,28	6,41	21,51	21,01					
1,23	6,17	21,57	20,77					
1,17	5,87	21,27	20,47					
1,16	5,81	21,21	20,41					
1,12	5,61	21,11	20,21					
1,10	5,48	20,98	20,08					
1,07	5,34	21,04	20,14					
1,07	5,34	21,04	20,14					
1,01	5,05	20,75	19,85					
1,01	5,05	20,95	19,95					
1,01	5,05	20,95	19,95					
0,97	4,83	20,93	19,73					
0,94	4,68	20,78	19,48					
0,90	4,49	20,79	19,39					
0,87	4,36	20,66	19,26					
0,87	4,36	20,76	19,36					
0,83	4,14	20,54	19,14					
0,81	4,04	20,44	19,04					
0,78	3,89	20,29	18,79					
0,75	3,77	20,17	18,67					
0,75	3,77	20,17	18,67					
0,74	3,69	20,29	18,89					
0,70	3,51	20,11	18,71					
0,67	3,34	19,94	18,54					
0,65	3,24	20,04	18,64					
0,61	3,07	19,87	18,47					

Prog (m)	Z (cm)	F 00:09:30 (cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30 (cm)	F 00:12:30 (cm)	F 00:13:30 (cm)	F 00:14:30 (cm)	F 00:15:30 (cm)
1,28	6,41							
1,23	6,17							
1,17	5,87							
1,16	5,81							
1,12	5,61							
1,10	5,48							
1,07	5,34							
1,07	5,34							
1,01	5,05							
1,01	5,05							
1,01	5,05							
0,97	4,83							
0,94	4,68							
0,90	4,49							
0,87	4,36							
0,87	4,36							
0,83	4,14							
0,81	4,04							
0,78	3,89							
0,75	3,77							
0,75	3,77							
0,74	3,69							
0,70	3,51							
0,67	3,34							
0,65	3,24							
0,61	3,07							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:16:30 (cm)	F 00:17:30 (cm)	F 00:18:30 (cm)	F 00:19:30 (cm)	F 00:20:30 (cm)	F 00:21:30 (cm)	F 00:22:30 (cm)
1,28	6,41							
1,23	6,17							
1,17	5,87							
1,16	5,81							
1,12	5,61							
1,10	5,48							
1,07	5,34							
1,07	5,34							
1,01	5,05							
1,01	5,05							
1,01	5,05							
0,97	4,83							
0,94	4,68							
0,90	4,49							
0,87	4,36							
0,87	4,36							
0,83	4,14							
0,81	4,04							
0,78	3,89							
0,75	3,77							
0,75	3,77							
0,74	3,69							
0,70	3,51							
0,67	3,34							
0,65	3,24							
0,61	3,07							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:23:30 (cm)	F 00:24:30 (cm)	F 00:25:30 (cm)	F 00:26:30 (cm)	F 00:27:30 (cm)	F 00:28:30 (cm)	F 00:29:30 (cm)
1,28	6,41							6,41
1,23	6,17							
1,17	5,87							
1,16	5,81							
1,12	5,61							
1,10	5,48							
1,07	5,34							
1,07	5,34							
1,01	5,05							
1,01	5,05							
1,01	5,05							
0,97	4,83							
0,94	4,68							
0,90	4,49							
0,87	4,36							
0,87	4,36							
0,83	4,14							
0,81	4,04							
0,78	3,89							
0,75	3,77							
0,75	3,77							
0,74	3,69							
0,70	3,51							
0,67	3,34							
0,65	3,24							
0,61	3,07							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:30:30 (cm)	F 00:31:30 (cm)	F 00:32:30 (cm)	F 00:33:30 (cm)	F 00:34:30 (cm)	F 00:35:30 (cm)	F 00:36:30 (cm)
1,28	6,41	18,41	18,71	18,71	18,71	18,71	18,71	19,31
1,23	6,17	18,27	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87	19,07
1,17	5,87	18,17	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87
1,16	5,81	5,81	18,81	18,81	18,91	18,91	18,91	18,81
1,12	5,61		18,71	18,61	18,71	18,71	18,71	18,91
1,10	5,48		5,48	18,58	18,58	18,58	18,58	18,78
1,07	5,34			18,44	18,44	18,44	18,44	18,74
1,07	5,34			18,44	18,44	18,44	18,44	18,74
1,01	5,05			5,05	17,45	17,45	17,45	17,45
1,01	5,05				17,45	17,45	17,45	17,45
1,01	5,05				17,45	16,85	17,45	17,45
0,97	4,83				4,83	16,63	17,23	17,23
0,94	4,68					16,48	17,18	17,18
0,90	4,49					4,49	16,99	16,99
0,87	4,36						16,96	16,96
0,87	4,36						16,96	16,76
0,83	4,14						4,14	16,54
0,81	4,04							16,44
0,78	3,89							16,29
0,75	3,77							3,77
0,75	3,77							
0,74	3,69							
0,70	3,51							
0,67	3,34							
0,65	3,24							
0,61	3,07							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:37:30 (cm)	F 00:38:30 (cm)	F 00:39:30 (cm)	F 00:40:30 (cm)	F 00:41:30 (cm)	F 00:42:30 (cm)	F 00:43:30 (cm)
1,28	6,41	19,31	19,31	19,31	19,31	19,31	19,31	19,31
1,23	6,17	19,07	19,07	19,07	19,07	19,07	19,07	19,07
1,17	5,87	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87
1,16	5,81	18,81	18,81	18,81	18,81	18,81	18,81	18,81
1,12	5,61	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91
1,10	5,48	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78
1,07	5,34	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74
1,07	5,34	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74
1,01	5,05	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
1,01	5,05	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
1,01	5,05	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
0,97	4,83	18,13	18,13	18,13	18,13	18,13	18,13	18,13
0,94	4,68	17,98	17,98	17,98	17,98	17,98	17,98	17,98
0,90	4,49	17,79	17,79	17,79	17,79	17,79	17,79	17,79
0,87	4,36	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66
0,87	4,36	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66
0,83	4,14	17,64	17,64	17,64	17,64	17,64	17,64	17,64
0,81	4,04	17,54	17,54	17,54	17,54	17,54	17,54	17,54
0,78	3,89	16,89	16,89	16,89	16,89	16,89	16,89	16,89
0,75	3,77	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57
0,75	3,77	16,57	15,87	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57
0,74	3,69	3,69	15,79	16,49	16,49	16,49	16,50	16,50
0,70	3,51		15,61	15,91	16,21	16,21	16,30	16,30
0,67	3,34		3,34	15,74	16,04	16,04	16,20	16,20
0,65	3,24			15,64	15,94	15,94	16,10	16,10
0,61	3,07			3,07	15,77	15,77	15,90	15,90

Prog (m)	Z (cm)	F 00:44:30 (cm)	F 00:45:30 (cm)	F 00:46:30 (cm)	F 00:47:30 (cm)	F 00:48:30 (cm)	F 00:49:30 (cm)	F 00:50:30 (cm)
1,28	6,41	19,31	19,31	19,31	19,31	19,31	19,31	19,31
1,23	6,17	19,07	19,10	19,07	19,07	19,07	19,07	19,07
1,17	5,87	18,87	18,90	18,87	18,87	18,87	18,87	18,87
1,16	5,81	18,81	18,90	18,81	18,81	18,81	18,81	18,81
1,12	5,61	18,91	18,91	18,61	18,61	18,61	18,61	18,61
1,10	5,48	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78
1,07	5,34	18,74	18,74	18,64	18,64	18,64	18,64	18,64
1,07	5,34	18,74	18,74	18,64	18,64	18,64	18,64	18,64
1,01	5,05	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
1,01	5,05	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
1,01	5,05	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
0,97	4,83	18,13	18,13	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23
0,94	4,68	17,98	17,98	17,98	17,98	17,98	17,98	17,98
0,90	4,49	17,79	17,79	17,79	17,79	17,79	17,79	17,79
0,87	4,36	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66
0,87	4,36	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66
0,83	4,14	17,64	17,64	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44
0,81	4,04	17,54	17,54	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44
0,78	3,89	16,89	16,89	17,29	17,29	17,29	17,29	17,29
0,75	3,77	16,57	16,57	17,17	17,17	17,17	17,17	17,17
0,75	3,77	16,57	16,57	17,17	17,17	17,17	17,17	17,17
0,74	3,69	16,50	16,50	17,09	17,09	17,09	17,09	17,09
0,70	3,51	16,30	16,30	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01
0,67	3,34	16,20	16,20	16,84	16,84	16,84	16,84	16,84
0,65	3,24	16,10	16,10	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94
0,61	3,07	15,90	15,90	16,77	16,77	16,77	16,77	16,77

Prog (m)	Z (cm)	F 00:51:30 (cm)	F 00:52:30 (cm)
1,28	6,41	19,31	19,31
1,23	6,17	19,07	19,07
1,17	5,87	18,87	18,87
1,16	5,81	18,81	18,81
1,12	5,61	18,61	18,61
1,10	5,48	18,78	18,78
1,07	5,34	18,64	18,64
1,07	5,34	18,64	18,64
1,01	5,05	18,45	18,45
1,01	5,05	18,45	18,45
1,01	5,05	18,45	18,45
0,97	4,83	18,23	18,23
0,94	4,68	17,98	17,98
0,90	4,49	17,79	17,79
0,87	4,36	17,66	17,66
0,87	4,36	17,66	17,66
0,83	4,14	17,44	17,44
0,81	4,04	17,44	17,44
0,78	3,89	17,29	17,29
0,75	3,77	17,17	17,17
0,75	3,77	17,17	17,17
0,74	3,69	17,09	17,09
0,70	3,51	17,01	17,01
0,67	3,34	16,84	16,84
0,65	3,24	16,94	16,94
0,61	3,07	16,77	16,77

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	H 00:18:30 (cm)	H 00:32:00 (cm)	Hf (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:05:30 (cm)	F 00:06:30 (cm)	F 00:07:30 (cm)
0,57	2,86	19,66	19,66	19,66	18,26				
0,54	2,68	19,58	19,58	19,58	18,08				
0,51	2,53	19,43	19,43	19,43	17,93				
0,47	2,35	19,25	19,25	19,25	17,75				
0,47	2,34	19,34	19,34	19,34	17,84				
0,45	2,26	19,26	19,26	19,26	17,76				
0,43	2,16	19,46	19,46	19,46	17,76				
0,43	2,16	19,46	19,46	19,46	17,76				
0,39	1,95	19,25	19,25	19,25	17,55				
0,34	1,69	19,19	19,19	19,19	18,09				
0,27	1,37	18,87	18,87	18,87	17,77				
0,26	1,29	18,79	18,79	18,79	17,69				
0,22	1,11	18,81	18,81	18,81	17,51				
0,18	0,90	18,60	18,60	18,60	17,30				
0,14	0,71	18,41	18,41	18,41	17,11				
0,11	0,57	18,27	18,27	18,27	16,97				
0,07	0,35	18,06	18,06	18,06	16,76				
0,04	0,18	17,89	17,89	17,89	16,59				
0,00	0,00	17,90	17,90	17,90	16,40				

Prog (m)	Z (cm)	F 00:08:30 (cm)	F 00:09:30 (cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30 (cm)	F 00:12:30 (cm)	F 00:13:30 (cm)	F 00:14:30 (cm)
0,57	2,86							
0,54	2,68							
0,51	2,53							
0,47	2,35							
0,47	2,34							
0,45	2,26							
0,43	2,16							
0,43	2,16							
0,39	1,95							
0,34	1,69							
0,27	1,37							
0,26	1,29							
0,22	1,11							
0,18	0,90							
0,14	0,71							
0,11	0,57							
0,07	0,35							
0,04	0,18							
0,00	0,00							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:15:30 (cm)	F 00:16:30 (cm)	F 00:17:30 (cm)	F 00:18:30 (cm)	F 00:19:30 (cm)	F 00:20:30 (cm)	F 00:21:30 (cm)
0,57	2,86							
0,54	2,68							
0,51	2,53							
0,47	2,35							
0,47	2,34							
0,45	2,26							
0,43	2,16							
0,43	2,16							
0,39	1,95							
0,34	1,69							
0,27	1,37							
0,26	1,29							
0,22	1,11							
0,18	0,90							
0,14	0,71							
0,11	0,57							
0,07	0,35							
0,04	0,18							
0,00	0,00							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:22:30 (cm)	F 00:23:30 (cm)	F 00:24:30 (cm)	F 00:25:30 (cm)	F 00:26:30 (cm)	F 00:27:30 (cm)	F 00:28:30 (cm)
0,57	2,86							
0,54	2,68							
0,51	2,53							
0,47	2,35							
0,47	2,34							
0,45	2,26							
0,43	2,16							
0,43	2,16							
0,39	1,95							
0,34	1,69							
0,27	1,37							
0,26	1,29							
0,22	1,11							
0,18	0,90							
0,14	0,71							
0,11	0,57							
0,07	0,35							
0,04	0,18							
0,00	0,00							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:29:30 (cm)	F 00:30:30 (cm)	F 00:31:30 (cm)	F 00:32:30 (cm)	F 00:33:30 (cm)	F 00:34:30 (cm)	F 00:35:30 (cm)
0,57	2,86							
0,54	2,68							
0,51	2,53							
0,47	2,35							
0,47	2,34							
0,45	2,26							
0,43	2,16							
0,43	2,16							
0,39	1,95							
0,34	1,69							
0,27	1,37							
0,26	1,29							
0,22	1,11							
0,18	0,90							
0,14	0,71							
0,11	0,57							
0,07	0,35							
0,04	0,18							
0,00	0,00							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:36:30 (cm)	F 00:37:30 (cm)	F 00:38:30 (cm)	F 00:39:30 (cm)	F 00:40:30 (cm)	F 00:41:30 (cm)	F 00:42:30 (cm)
0,57	2,86					15,56	15,56	15,56
0,54	2,68					2,68	15,38	15,38
0,51	2,53						15,23	15,23
0,47	2,35						2,35	15,05
0,47	2,34							15,00
0,45	2,26							9,90
0,43	2,16							2,26
0,43	2,16							
0,39	1,95							
0,34	1,69							
0,27	1,37							
0,26	1,29							
0,22	1,11							
0,18	0,90							
0,14	0,71							
0,11	0,57							
0,07	0,35							
0,04	0,18							
0,00	0,00							

Prog (m)	Z (cm)	F 00:43:30 (cm)	F 00:44:30 (cm)	F 00:44:30 (cm)	F 00:45:30 (cm)	F 00:46:30 (cm)	F 00:47:30 (cm)	F 00:48:30 (cm)	F 00:49:30 (cm)
0,57	2,86	15,56	15,56	15,56	15,56	16,46	16,46	16,46	16,46
0,54	2,68	15,38	15,38	15,38	15,38	16,28	16,28	16,28	16,28
0,51	2,53	15,23	15,23	15,23	15,23	16,13	16,13	16,13	16,13
0,47	2,35	15,05	15,05	15,05	15,05	15,95	15,95	15,95	15,95
0,47	2,34	15,00	15,00	15,00	15,00	16,04	16,04	16,04	16,04
0,45	2,26	15,00	15,00	15,00	15,00	15,96	15,96	15,96	15,96
0,43	2,16	15,00	15,00	15,00	15,00	16,06	16,06	16,06	16,06
0,43	2,16	15,06	15,06	15,06	15,06	16,06	16,06	16,06	16,06
0,39	1,95	1,95	14,85	14,85	14,85	15,85	15,85	15,85	15,85
0,34	1,69		14,59	14,59	14,59	15,59	15,59	15,59	15,59
0,27	1,37		1,37	1,37	14,27	15,27	15,27	15,27	15,27
0,26	1,29				14,19	15,29	15,29	15,29	15,29
0,22	1,11				9,71	15,09	15,11	15,11	15,11
0,18	0,90				5,20	12,55	15,00	14,90	14,90
0,14	0,71				0,71	10,03	12,49	14,81	14,81
0,11	0,57					7,77	10,40	12,97	14,67
0,07	0,35					5,02	7,50	9,51	12,06
0,04	0,18					2,52	5,01	6,86	9,49
0,00	0,00					0,00	2,50	4,20	6,90

Prog (m)	Z (cm)	F 00:51:30 (cm)	F 00:52:30 (cm)
0,57	2,86	16,46	16,46
0,54	2,68	16,28	16,28
0,51	2,53	16,13	16,13
0,47	2,35	15,95	15,95
0,47	2,34	16,04	16,04
0,45	2,26	15,96	15,96
0,43	2,16	16,06	16,06
0,43	2,16	16,06	16,06
0,39	1,95	15,85	15,85
0,34	1,69	15,59	15,59
0,27	1,37	15,27	15,27
0,26	1,29	15,29	15,29
0,22	1,11	15,11	15,11
0,18	0,90	15,30	15,30
0,14	0,71	14,91	14,91
0,11	0,57	14,77	14,77
0,07	0,35	14,56	14,56
0,04	0,18	14,39	14,39
0,00	0,00	14,00	14,20

ANEXO ENSAYO 2.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F ini (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:15:00 (cm)
0,00	0,00	18,50	18,50	14,80	14,80	14,80	14,80
0,30	1,50	19,20	19,10	15,70	15,70	15,70	15,70
0,60	3,00	20,00	19,60	15,90	15,90	16,90	16,90
0,90	4,50	21,20	19,50	16,40	16,90	17,70	17,70
1,20	6,00	22,10	20,40	17,20	18,70	18,70	18,80
1,50	7,50	23,00	20,20	19,20	19,90	19,90	20,20
1,80	9,00	24,20	20,80	20,20	20,90	20,90	21,10
2,10	10,50	24,90	21,00	21,60	21,80	21,80	21,90
2,40	12,00	26,00	21,80	22,10	22,80	22,80	22,50
2,70	13,50	26,90	22,00	23,40	23,80	23,80	23,40
3,00	15,00	27,60	22,20	23,90	24,90	24,90	23,90
3,30	16,50	28,50	22,10	24,50	25,80	25,80	24,40
3,60	18,00	29,70	21,90	26,40	26,90	26,60	25,00
3,90	19,50	30,50	21,60	26,80	27,70	27,10	24,80
4,20	21,00	31,20	22,70	27,60	28,60	28,10	25,40
4,50	22,50	32,80	24,10	28,80	29,80	29,40	27,00
4,80	24,00	34,00	25,70	30,10	30,00	30,00	27,90
5,10	25,50	34,90	27,40	31,40	31,90	30,90	29,40
5,40	27,00	36,50	28,50	32,80	32,40	31,40	30,10
5,70	28,50	38,30	30,30	34,30	33,90	32,70	31,30
6,26	31,30	40,90	33,00	37,20	36,30	33,90	33,90
6,56	32,80	42,80	34,90	39,10	37,10	35,40	35,10
6,86	34,30	44,20	36,00	40,60	37,90	36,50	34,80
7,16	35,80	45,70	37,40	41,70	38,70	37,10	35,80
7,46	37,30	46,40	38,90	42,70	40,10	37,30	
7,76	38,80	48,30	40,50	44,80	40,20		
8,06	40,30	49,60	41,80	45,90	40,30		

Prog (m)	Z (cm)	F 00:25:00 (cm)	F 00:35:00 (cm)	F 00:55:00 (cm)	F 01:15:00 (cm)	F 02:00:00 (cm)
0,00	0,00	14,80	14,80	14,80	14,80	14,30
0,30	1,50	15,70	15,70	15,70	15,70	15,90
0,60	3,00	15,90	15,90	15,90	15,90	16,40
0,90	4,50	16,40	16,90	16,40	16,50	17,00
1,20	6,00	17,20	17,60	17,60	17,00	16,70
1,50	7,50	19,20	18,10	18,10	17,40	16,90
1,80	9,00	20,20	19,80	18,80	17,90	17,10
2,10	10,50	20,50	19,80	19,10	18,40	16,90
2,40	12,00	21,90	20,60	20,20	18,60	17,00
2,70	13,50	22,90	21,80	20,40	18,80	16,90
3,00	15,00	23,40	22,30	20,60	18,80	15,00
3,30	16,50	24,40	22,60	20,50	18,40	
3,60	18,00	25,20	22,90	20,10	18,00	
3,90	19,50	24,90	22,40	20,00		
4,20	21,00	25,40	23,40	21,00		
4,50	22,50	25,80	25,40			
4,80	24,00	26,60	26,40			
5,10	25,50	28,00	27,50			
5,40	27,00	29,30	27,00			
5,70	28,50	30,80				
6,26	31,30	32,20				
6,56	32,80	32,80				
6,86	34,30					
7,16	35,80					
7,46	37,30					
7,76	38,80					
8,06	40,30					

ANEXO ENSAYO 3.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:09:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:11:00 (cm)	F 00:12:00 (cm)	F 00:13:30 (cm)
7,29	36,46	40,86	40,86						
6,69	33,46	36,46	37,56						
6,39	31,96	34,56	35,96						
6,09	30,46	33,66	34,86						
5,84	29,18	31,78	33,68						
5,60	27,98	30,88	32,38						
5,36	26,81	29,61	31,71	26,81	26,81	26,81	26,81	26,81	26,81
4,99	24,96	27,76	29,86	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96
4,69	23,46	25,66	28,46	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56
3,97	19,86	22,26	25,66	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96
3,52	17,61	20,51	24,21	18,71	18,71	18,71	18,71	18,71	18,71
3,37	16,86	19,26	22,86	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06	18,36
3,22	16,11	18,61	22,51	17,31	17,41	17,41	17,41	17,41	18,01
3,11	15,53	17,83	21,93	16,83	16,83	16,93	16,93	16,93	17,83
3,05	15,27	17,77	21,77	16,57	16,67	16,87	16,87	16,87	17,67
2,87	14,37	16,97	20,97	15,77	15,87	16,17	16,17	16,17	16,97
2,57	12,87	15,27	19,77	14,37	14,57	14,97	14,97	14,97	15,67
2,36	11,82	14,02	18,82	13,42	13,62	14,22	14,22	14,22	15,12
2,23	11,15	14,30	18,55	12,85	12,95	13,65	13,55	13,55	14,55
2,14	10,70	14,30	18,10	12,40	12,60	13,40	13,30	13,30	14,20
2,11	10,57	14,17	17,97	10,57	12,57	13,27	13,17	13,17	14,17
1,90	9,50	14,40	17,10		11,50	12,40	12,50	12,50	13,50
1,88	9,39	14,29	16,99		9,39	12,29	12,39	12,39	13,39
1,77	8,87	14,27	16,77			11,87	11,97	11,97	13,17

Prog (m)	Z (cm)	F 00:14:00 (cm)	F 00:14:00 (cm)	F 00:15:00 (cm)	F 00:16:00 (cm)	F 00:17:00 (cm)	F 00:18:00 (cm)
7,29	36,46						
6,69	33,46						
6,39	31,96						
6,09	30,46						
5,84	29,18						
5,60	27,98						
5,36	26,81	26,81	26,81	26,81	26,81	26,81	26,81
4,99	24,96	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96
4,69	23,46	24,56	24,56	24,86	24,86	24,86	24,86
3,97	19,86	20,96	20,96	22,16	22,16	22,16	22,16
3,52	17,61	18,71	18,71	20,31	20,31	20,31	20,31
3,37	16,86	18,36	18,36	19,76	19,76	19,76	19,76
3,22	16,11	18,01	18,01	19,31	19,31	19,31	19,31
3,11	15,53	17,83	17,83	18,83	18,83	18,83	18,83
3,05	15,27	17,67	17,67	18,67	18,67	18,67	18,67
2,87	14,37	16,97	16,97	17,97	17,97	17,97	18,27
2,57	12,87	15,67	15,67	17,17	17,17	17,17	16,67
2,36	11,82	15,12	15,12	16,22	16,22	16,22	16,22
2,23	11,15	14,55	14,55	15,65	15,65	15,65	15,65
2,14	10,70	14,20	14,20	15,20	15,20	15,20	15,20
2,11	10,57	14,17	14,17	15,07	15,07	15,07	15,07
1,90	9,50	13,50	13,50	14,30	14,30	14,30	14,40
1,88	9,39	13,39	13,39	14,29	14,29	14,29	14,29
1,77	8,87	13,17	13,17	13,87	13,87	13,87	13,87

Prog (m)	Z (cm)	F 00:25:00 (cm)	F 00:26:00 (cm)	F 00:27:26 (cm)	F 00:28:40 (cm)	F 00:29:40 (cm)	F 00:31:00 (cm)
7,29	36,46	36,46	36,46	36,46	36,46	36,46	36,46
6,69	33,46	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36	35,36
6,39	31,96	34,36	34,36	34,36	34,36	34,36	34,36
6,09	30,46	33,26	33,26	33,26	33,26	33,26	33,26
5,84	29,18	32,08	32,08	32,08	32,08	32,08	32,08
5,60	27,98	29,98	29,98	29,98	29,98	31,18	31,18
5,36	26,81	28,81	28,81	28,81	28,81	29,81	29,81
4,99	24,96	26,66	26,66	26,66	26,66	27,96	27,96
4,69	23,46	25,66	25,66	25,66	25,66	27,16	27,16
3,97	19,86	22,66	22,66	22,66	22,66	23,26	23,26
3,52	17,61	21,31	21,31	21,31	21,31	21,71	21,71
3,37	16,86	20,36	20,36	20,36	20,36	21,26	21,26
3,22	16,11	20,01	20,01	20,01	20,01	20,71	20,71
3,11	15,53	19,53	19,53	19,53	19,53	20,33	20,33
3,05	15,27	19,67	19,67	19,67	19,67	19,67	19,67
2,87	14,37	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77	18,77
2,57	12,87	17,27	17,27	17,27	17,27	17,87	17,87
2,36	11,82	16,22	16,22	16,22	16,22	17,22	17,22
2,23	11,15	15,65	15,65	15,65	15,65	16,55	16,55
2,14	10,70	15,30	15,20	15,20	15,20	16,10	16,10
2,11	10,57	15,37	15,07	15,07	15,07	15,97	15,97
1,90	9,50	14,30	14,40	14,40	14,40	15,40	15,40
1,88	9,39	14,29	14,29	14,29	14,29	15,29	15,29
1,77	8,87	13,87	13,87	13,87	13,87	14,87	14,87

Prog (m)	Z (cm)	F 00:31:00 (cm)	F 00:33:30 (cm)	F 00:38:00 (cm)
7,29	36,46	36,46	36,46	36,46
6,69	33,46	35,36	35,36	35,36
6,39	31,96	34,36	34,36	34,36
6,09	30,46	33,26	33,26	33,26
5,84	29,18	32,08	32,08	32,08
5,60	27,98	31,18	31,18	31,18
5,36	26,81	29,81	29,81	29,81
4,99	24,96	27,96	27,96	27,96
4,69	23,46	27,16	27,16	27,16
3,97	19,86	23,26	23,26	23,26
3,52	17,61	21,71	21,71	21,71
3,37	16,86	21,26	21,26	21,26
3,22	16,11	20,71	20,71	20,71
3,11	15,53	20,33	20,33	20,33
3,05	15,27	19,67	19,67	19,67
2,87	14,37	18,77	18,77	18,77
2,57	12,87	17,87	17,87	17,87
2,36	11,82	17,22	17,22	17,22
2,23	11,15	16,55	16,55	16,55
2,14	10,70	16,10	16,10	16,10
2,11	10,57	15,97	15,97	15,97
1,90	9,50	15,40	15,40	15,40
1,88	9,39	15,29	15,29	15,29
1,77	8,87	14,87	14,87	14,87

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:09:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:11:00 (cm)
1,77	8,86	14,26	16,76			8,86	11,96
1,74	8,69	14,09	16,59				11,89
1,71	8,54	14,24	16,54				11,74
1,68	8,38	14,08	16,38				8,38
1,62	8,08	14,28	16,08				
1,58	7,88	14,08	15,88				
1,54	7,70	14,10	15,80				
1,49	7,47	13,87	15,57				
1,48	7,39	14,19	15,79				
1,46	7,28	14,08	15,78				
1,45	7,25	14,15	15,75				
1,42	7,12	14,12	15,72				
1,41	7,07	14,17	15,67				
1,39	6,96	14,06	15,66				
1,36	6,81	14,01	15,51				
1,33	6,66	14,36	15,36				
1,31	6,56	14,16	15,36				
1,24	6,21	13,91	15,01				
1,23	6,13	13,83	14,93				
1,19	5,94	13,84	14,74				
1,14	5,71	13,61	14,51				
1,09	5,43	13,33	14,23				
1,02	5,08	13,15	13,94				
0,98	4,88	13,12	13,80				
0,92	4,62	13,03	13,60				
0,88	4,39	12,97	13,43				

Prog (m)	Z (cm)	F 00:15:00 (cm)	F 00:16:00 (cm)	F 00:17:00 (cm)	F 00:18:00 (cm)	F 00:13:30 (cm)	F 00:14:00 (cm)
1,77	8,86	13,16	13,16	13,86	13,86	13,86	13,86
1,74	8,69	12,99	12,99	13,69	13,69	13,69	13,69
1,71	8,54	12,94	12,94	13,64	13,64	13,64	13,64
1,68	8,38	12,78	12,98	13,58	13,58	13,58	13,48
1,62	8,08	12,48	12,78	13,28	13,28	13,28	13,18
1,58	7,88	12,28	12,58	13,18	13,18	13,18	12,98
1,54	7,70	12,10	12,50	13,00	13,00	13,00	12,80
1,49	7,47	7,47	12,37	12,87	12,87	12,87	12,57
1,48	7,39		12,29	12,79	12,79	12,79	12,59
1,46	7,28		7,28	12,78	12,78	12,78	12,48
1,45	7,25			12,75	12,75	12,75	12,45
1,42	7,12			12,62	12,62	12,62	12,22
1,41	7,07			10,27	12,47	12,47	12,17
1,39	6,96			6,96	12,36	12,36	12,06
1,36	6,81				12,21	12,21	12,01
1,33	6,66				6,66	12,16	11,86
1,31	6,56					12,06	11,76
1,24	6,21					6,21	11,41
1,23	6,13						10,43
1,19	5,94						8,34
1,14	5,71						5,71
1,09	5,43						
1,02	5,08						
0,98	4,88						
0,92	4,62						
0,88	4,39						

Prog (m)	Z (cm)	F 00:19:00 (cm)	F 00:20:22 (cm)	F 00:21:00 (cm)	F 00:22:22 (cm)	F 00:23:00 (cm)	F 00:24:00 (cm)
1,77	8,86	13,86	13,96	13,96	13,96	13,86	13,86
1,74	8,69	13,69	13,79	13,79	13,79	13,69	13,69
1,71	8,54	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64
1,68	8,38	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48
1,62	8,08	13,18	13,48	13,48	13,48	13,18	13,18
1,58	7,88	12,98	13,28	13,28	13,28	12,98	12,98
1,54	7,70	12,80	13,10	13,10	13,10	12,80	12,80
1,49	7,47	12,57	12,87	12,87	12,87	12,57	12,57
1,48	7,39	12,59	12,79	12,79	12,79	12,59	12,59
1,46	7,28	12,48	12,68	12,68	12,68	12,48	12,48
1,45	7,25	12,45	12,65	12,65	12,85	12,45	12,45
1,42	7,12	12,32	12,52	12,52	12,72	12,32	12,32
1,41	7,07	12,27	12,47	12,47	12,97	12,97	12,37
1,39	6,96	12,16	12,36	12,36	12,86	12,86	12,26
1,36	6,81	12,01	12,31	12,31	12,81	12,71	12,51
1,33	6,66	11,86	12,16	12,16	12,66	12,66	12,36
1,31	6,56	11,76	12,26	12,26	12,56	12,56	12,56
1,24	6,21	11,41	11,91	11,91	12,91	12,91	12,91
1,23	6,13	11,33	11,83	12,03	12,83	12,83	12,83
1,19	5,94	11,14	12,34	11,94	12,64	12,64	12,64
1,14	5,71	9,41	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61
1,09	5,43	7,43	12,33	12,33	12,33	12,33	12,33
1,02	5,08	5,08	11,98	11,98	11,98	11,98	11,98
0,98	4,88		9,48	11,78	11,78	11,78	11,78
0,92	4,62		4,62	11,52	11,52	11,52	11,52
0,88	4,39			8,79	11,29	11,29	11,29

Prog (m)	Z (cm)	F 00:33:30 (cm)	F 00:38:00 (cm)
1,77	8,86	14,86	14,86
1,74	8,69	14,69	14,69
1,71	8,54	14,64	14,64
1,68	8,38	14,48	14,48
1,62	8,08	14,18	14,18
1,58	7,88	13,98	13,98
1,54	7,70	13,80	13,80
1,49	7,47	13,57	13,57
1,48	7,39	13,69	13,69
1,46	7,28	13,58	13,58
1,45	7,25	13,75	13,75
1,42	7,12	13,72	13,72
1,41	7,07	13,67	13,67
1,39	6,96	13,56	13,56
1,36	6,81	13,51	13,51
1,33	6,66	13,36	13,36
1,31	6,56	13,26	13,26
1,24	6,21	13,01	13,01
1,23	6,13	12,93	12,93
1,19	5,94	12,74	12,74
1,14	5,71	12,61	12,61
1,09	5,43	12,33	12,33
1,02	5,08	11,98	11,98
0,98	4,88	11,78	11,78
0,92	4,62	11,52	11,52
0,88	4,39	11,29	11,29

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:09:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:11:00 (cm)
0,82	4,08	12,66	13,12				
0,74	3,72	12,47	12,82				
0,68	3,42	12,34	12,58				
0,65	3,26	12,35	12,48				
0,62	3,11	12,20	12,33				
0,60	2,99	12,25	12,27				
0,56	2,82	12,08	12,10				
0,54	2,68	12,11	12,02				
0,51	2,53	12,13	11,93				
0,47	2,33	11,93	11,73				
0,42	2,12	12,12	11,58				
0,37	1,84	11,94	11,36				
0,34	1,72	11,92	11,30				
0,30	1,51	12,11	11,15				
0,26	1,29	11,89	10,99				
0,23	1,15	11,75	10,85				
0,20	1,02	11,62	10,82				
0,17	0,84	11,54	10,64				
0,13	0,66	11,45	10,56				
0,08	0,38	11,34	10,78				
0,00	0,00	10,90	10,90				

Prog (m)	Z (cm)	F 00:12:00 (cm)	F 00:13:30 (cm)	F 00:14:00 (cm)	F 00:15:00 (cm)	F 00:16:00 (cm)	F 00:17:00 (cm)
0,82	4,08						
0,74	3,72						
0,68	3,42						
0,65	3,26						
0,62	3,11						
0,60	2,99						
0,56	2,82						
0,54	2,68						
0,51	2,53						
0,47	2,33						
0,42	2,12						
0,37	1,84						
0,34	1,72						
0,30	1,51						
0,26	1,29						
0,23	1,15						
0,20	1,02						
0,17	0,84						
0,13	0,66						
0,08	0,38						
0,00	0,00						

Prog (m)	Z (cm)	F 00:18:00 (cm)	F 00:19:00 (cm)	F 00:20:22 (cm)	F 00:21:00 (cm)	F 00:22:22 (cm)	F 00:23:00 (cm)
0,82	4,08				4,08	10,98	10,98
0,74	3,72					6,22	10,62
0,68	3,42					3,22	10,32
0,65	3,26					3,26	8,66
0,62	3,11						7,31
0,60	2,99						5,59
0,56	2,82						3,62
0,54	2,68						2,68
0,51	2,53						
0,47	2,33						
0,42	2,12						
0,37	1,84						
0,34	1,72						
0,30	1,51						
0,26	1,29						
0,23	1,15						
0,20	1,02						
0,17	0,84						
0,13	0,66						
0,08	0,38						
0,00	0,00						

Prog (m)	Z (cm)	F 00:24:00 (cm)	F 00:25:00 (cm)	F 00:26:00 (cm)	F 00:27:26 (cm)	F 00:28:40 (cm)	F 00:29:40 (cm)
0,82	4,08	10,98	10,98	10,98	10,98	10,98	10,98
0,74	3,72	10,62	10,62	10,62	10,62	10,62	10,62
0,68	3,42	10,32	10,32	10,32	10,32	10,32	10,32
0,65	3,26	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
0,62	3,11	10,01	10,01	10,01	10,01	10,01	10,01
0,60	2,99	9,89	9,89	9,89	9,89	9,89	9,89
0,56	2,82	9,72	9,72	9,72	9,72	9,72	9,72
0,54	2,68	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58
0,51	2,53	7,93	9,43	9,43	9,43	9,43	9,43
0,47	2,33	5,13	9,23	9,23	9,23	9,23	9,23
0,42	2,12	2,12	7,12	8,52	8,52	8,52	9,02
0,37	1,84		4,44	8,24	8,24	8,24	8,74
0,34	1,72		3,12	8,12	8,12	8,12	8,62
0,30	1,51		1,51	6,01	7,91	7,91	8,41
0,26	1,29			2,89	7,69	7,69	8,19
0,23	1,15			1,15	7,55	7,55	8,05
0,20	1,02				5,72	7,42	7,92
0,17	0,84				3,24	7,24	7,74
0,13	0,66				0,66	6,06	7,56
0,08	0,38					3,78	5,98
0,00	0,00					1,00	3,90

Prog (m)	Z (cm)	F 00:31:00 (cm)	F 00:33:30 (cm)	F 00:38:00 (cm)
0,82	4,08	10,98	10,98	10,98
0,74	3,72	10,62	10,62	10,62
0,68	3,42	10,32	10,32	10,32
0,65	3,26	10,16	10,16	10,16
0,62	3,11	10,01	10,01	10,01
0,60	2,99	9,89	9,89	9,89
0,56	2,82	9,72	9,72	9,72
0,54	2,68	9,58	9,58	9,58
0,51	2,53	9,43	9,43	9,43
0,47	2,33	9,23	9,23	9,23
0,42	2,12	9,02	9,02	9,02
0,37	1,84	8,74	8,74	8,74
0,34	1,72	8,62	8,62	8,62
0,30	1,51	8,41	8,41	8,41
0,26	1,29	8,19	8,19	8,19
0,23	1,15	8,05	8,05	8,05
0,20	1,02	7,92	7,92	7,92
0,17	0,84	7,74	7,74	7,74
0,13	0,66	7,56	7,56	7,56
0,08	0,38	6,28	6,28	6,28
0,00	0,00	5,90	5,90	5,90

ANEXO ENSAYO 4.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F inicial (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:05:00 (cm)	F 00:07:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)
6,38	31,88	36,18	34,88	34,58					
6,17	30,85	35,15	33,45	33,75	31,05				
5,57	27,85	31,85	31,05	30,45	29,75				
5,35	26,75	30,85	29,35	29,55	29,55	26,75			
5,03	25,13	29,53	28,03	27,93	27,60	26,93	25,13		
4,82	24,08	28,58	26,88	27,38	26,40	26,30	25,18	24,08	
4,52	22,58	27,48	25,38	26,08	25,00	25,50	24,08	22,88	
4,06	20,32	25,22	22,52	23,22	23,22	23,22	22,50	21,42	
3,99	19,97	24,77	22,37	22,97	22,97	22,97	22,60	21,27	
3,88	19,42	24,12	21,72	22,82	22,82	22,82	22,00	20,72	19,42
3,83	19,17	23,97	21,57	22,57	22,57	22,57	22,00	20,67	19,47
3,72	18,60	23,40	21,10	22,00	22,00	22,00	22,00	20,40	19,40
3,42	17,10	22,60	19,40	21,10	21,10	21,10	21,10	20,00	19,50
3,30	16,52	22,42	19,02	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	19,52
2,55	12,77	19,17	15,37	18,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
2,46	12,32	18,92	14,72	18,00	16,80	16,80	16,80	16,80	16,80
2,29	11,47	18,17	13,97	17,37	15,87	15,87	15,87	15,87	16,00
2,13	10,67	17,27	12,87	16,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57
1,97	9,87	16,67	12,27	15,70	15,17	15,17	15,17	15,17	15,17
1,83	9,14	15,94	12,04	15,10	14,54	14,54	14,54	14,54	14,54
1,73	8,67	15,57	11,67	14,60	14,07	14,07	14,07	14,07	14,07
1,57	7,87	14,87	10,97	14,27	13,00	13,00	12,87	12,87	13,30
1,37	6,87	14,27	11,17	13,50	12,27	12,27	12,27	12,27	12,40
1,15	5,77	13,47	10,67	12,20	11,67	11,67	11,67	11,67	11,67
0,77	3,87	12,17	10,27	11,00	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27

Prog (m)	Z (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:12:00 (cm)	F 00:14:00 (cm)	F 00:16:00 (cm)	F 00:18:00 (cm)	F 00:20:00 (cm)	F 00:22:00 (cm)
6,38	31,88							
6,17	30,85							
5,57	27,85							
5,35	26,75							
5,03	25,13							
4,82	24,08							
4,52	22,58							
4,06	20,32							
3,99	19,97							
3,88	19,42							
3,83	19,17							
3,72	18,60							
3,42	17,10	17,10						
3,30	16,52	18,02	16,52					
2,55	12,77	16,30	15,40					
2,46	12,32	16,00	15,20	12,32				
2,29	11,47	15,50	15,00	13,00	11,47			
2,13	10,67	15,00	14,50	13,30	12,07	10,67		
1,97	9,87	14,60	14,17	13,57	12,17	11,00		
1,83	9,14	14,00	13,84	13,20	11,84	11,04	9,14	
1,73	8,67	13,70	13,60	13,00	11,87	11,07	9,40	8,67
1,57	7,87	12,87	12,87	12,60	11,80	10,67	10,00	9,57
1,37	6,87	12,27	12,27	12,27	11,30	10,47	10,40	9,97
1,15	5,77	11,67	11,67	11,67	11,00	10,17	9,80	9,87
0,77	3,87	10,27	10,27	10,27	10,27	9,77	9,90	9,27

Prog (m)	Z (cm)	F 00:24:00 (cm)	F 00:26:00 (cm)	F 00:28:00 (cm)	F 00:30:00 (cm)	F 00:40:00 (cm)
6,38	31,88					
6,17	30,85					
5,57	27,85					
5,35	26,75					
5,03	25,13					
4,82	24,08					
4,52	22,58					
4,06	20,32					
3,99	19,97					
3,88	19,42					
3,83	19,17					
3,72	18,60					
3,42	17,10					
3,30	16,52					
2,55	12,77					
2,46	12,32					
2,29	11,47					
2,13	10,67					
1,97	9,87					
1,83	9,14					
1,73	8,67					
1,57	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
1,37	6,87	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27
1,15	5,77	8,67	8,67	8,67	8,67	8,67
0,77	3,87	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F inicial (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:05:00 (cm)	F 00:07:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)
0,60	2,99	11,49	10,39	10,20	9,69	9,69	9,69	9,69	10,00
0,47	2,37	11,27	10,77	9,90	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50
0,41	2,04	11,34	10,84	9,44	9,44	9,44	9,44	9,44	9,44
0,37	1,84	11,24	10,64	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24
0,13	0,67	10,97	10,97	8,77	8,77	8,77	8,77	8,77	8,77
0,10	0,52	10,82	10,82	8,62	8,62	8,62	8,62	8,62	8,62
0,09	0,43	10,83	10,83	8,53	8,53	8,53	8,53	8,53	8,53
0,08	0,40	10,90	10,90	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
0,05	0,23	10,83	10,83	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63
0,00	0,00	10,60	10,60	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90

Prog (m)	Z (cm)	F 00:26:00 (cm)	F 00:28:00 (cm)	F 00:30:00 (cm)	F 00:40:00 (cm)
0,60	2,99	7,89	7,89	7,89	7,89
0,47	2,37	7,97	7,97	7,97	7,97
0,41	2,04	9,44	8,14	8,14	8,14
0,37	1,84	9,24	8,24	8,24	8,24
0,13	0,67	8,77	8,77	8,77	8,77
0,10	0,52	8,62	8,62	8,62	8,62
0,09	0,43	8,53	8,53	6,83	6,83
0,08	0,40	8,50	8,50	6,50	6,20
0,05	0,23	6,63	6,63	6,13	6,03
0,00	0,00	5,90	5,90	5,90	5,90

ANEXO ENSAYO 5.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog(m)	Z(cm)	Hi(cm)	Hf(cm)	F 00:03:27(cm)	F 00:04:27(cm)	F 00:05:27(cm)	F 00:06:27(cm)
6,34	47,55	49,30	49,30				
6,04	45,30	47,01	47,01				
5,74	43,05	45,86	45,86				
5,44	40,80	42,61	42,61				
5,14	38,55	40,26	40,26				
4,84	36,30	38,01	38,01				
4,54	34,05	35,80	35,80				
4,24	31,80	33,46	33,46				
3,94	29,55	32,11	32,11				
3,64	27,30	29,36	31,00				27,30
3,34	25,05	27,61	29,75				25,95
2,84	21,30	23,26	28,90	21,30			23,30
2,54	19,05	21,01	27,90	20,25	19,05	19,05	21,55
2,24	16,80	21,20	26,20	18,80	19,90	19,90	20,40
2,00	15,00	21,40	25,55	17,60	19,60	19,60	19,60
1,94	14,55	21,15	25,50	17,35	19,45	19,45	19,45
1,89	14,18	21,08	25,23	14,18	19,38	19,38	19,38
1,81	13,58	21,48	25,43		19,18	19,18	19,18
1,75	13,13	22,53	25,08		13,13	19,13	19,13
1,65	12,36	22,26	24,71			18,96	18,96
1,59	11,91	22,31	24,46			11,91	18,81
1,51	11,31	22,91	24,06				18,51
1,43	10,74	22,64	23,89				10,74
1,41	10,59	22,59	23,64				

Prog(m)	Z(cm)	F 00:07:27(cm)	F 00:08:27(cm)	F 00:09:27(cm)	F 00:10:27(cm)	F 00:11:27(cm)	F 00:12:27(cm)
6,34	47,55						
6,04	45,30						
5,74	43,05						
5,44	40,80						
5,14	38,55						
4,84	36,30						
4,54	34,05						
4,24	31,80						
3,94	29,55			29,55			
3,64	27,30	27,30		28,70	27,30	27,30	27,30
3,34	25,05	25,95	25,05	27,05	27,05	27,05	27,05
2,84	21,30	23,30	23,30	24,00	24,70	24,30	24,70
2,54	19,05	21,55	21,55	22,45	23,15	23,05	23,45
2,24	16,80	20,40	20,40	21,20	22,20	21,70	22,10
2,00	15,00	19,60	19,60	20,50	21,10	20,90	21,10
1,94	14,55	19,45	19,45	20,45	20,95	20,75	20,85
1,89	14,18	19,38	19,38	20,28	20,68	20,58	20,78
1,81	13,58	19,18	19,18	20,08	20,38	20,48	20,48
1,75	13,13	19,13	19,13	20,03	20,23	20,13	20,23
1,65	12,36	18,96	18,96	19,76	19,86	19,86	19,86
1,59	11,91	18,81	18,81	19,71	19,71	19,71	19,71
1,51	11,31	18,51	18,51	19,41	19,41	19,41	19,41
1,43	10,74	18,34	18,34	19,14	19,14	19,14	19,14
1,41	10,59	18,19	18,29	19,19	19,19	18,99	19,09

Prog(m)	Z(cm)	F 00:13:27(cm)	F 00:14:27(cm)	F 00:15:27(cm)	F 00:16:27(cm)	F 00:17:43(cm)	F 00:18:34(cm)
6,34	47,55						
6,04	45,30						
5,74	43,05						
5,44	40,80						
5,14	38,55						
4,84	36,30						
4,54	34,05						
4,24	31,80						
3,94	29,55						
3,64	27,30	27,30	27,30	27,30	27,30		
3,34	25,05	28,15	28,15	28,15	28,15	25,05	25,05
2,84	21,30	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
2,54	19,05	24,45	24,45	24,45	24,45	24,45	24,45
2,24	16,80	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20
2,00	15,00	22,40	22,40	22,10	22,10	22,10	22,60
1,94	14,55	22,25	22,25	22,05	22,05	22,05	22,45
1,89	14,18	21,98	21,98	21,78	21,78	21,78	22,28
1,81	13,58	21,68	21,68	21,98	21,98	21,98	21,98
1,75	13,13	21,53	21,53	21,63	21,63	21,63	21,63
1,65	12,36	21,06	21,06	21,26	21,26	21,26	21,26
1,59	11,91	20,81	20,81	21,01	21,01	21,01	21,01
1,51	11,31	20,51	20,51	20,61	20,61	20,61	20,61
1,43	10,74	20,14	20,14	20,44	20,44	20,44	20,14
1,41	10,59	20,09	20,09	20,19	20,19	20,19	20,19

Prog(m)	Z(cm)	F 00:19:27(cm)	F 00:20:27(cm)	F 00:21:27(cm)	F 00:22:30(cm)	F 00:23:04(cm)
6,34	47,55					
6,04	45,30					
5,74	43,05					
5,44	40,80					
5,14	38,55					
4,84	36,30					
4,54	34,05					
4,24	31,80					
3,94	29,55					29,55
3,64	27,30	27,30		27,30	27,30	28,90
3,34	25,05	27,65		27,65	27,55	27,65
2,84	21,30	26,00	21,30	27,52	27,52	25,90
2,54	19,05	24,45	24,97	25,97	25,97	25,97
2,24	16,80	23,20	23,72	24,72	24,72	24,72
2,00	15,00	22,60	23,10	23,90	23,62	23,62
1,94	14,55	22,45	22,85	23,85	23,57	23,57
1,89	14,18	22,28	22,58	23,58	23,30	23,30
1,81	13,58	21,98	22,18	23,50	23,50	23,50
1,75	13,13	21,63	22,03	23,15	23,15	23,15
1,65	12,36	21,26	21,76	22,78	22,78	22,78
1,59	11,91	21,01	21,51	22,53	22,53	22,53
1,51	11,31	20,61	21,11	22,13	22,13	22,13
1,43	10,74	20,14	20,64	21,74	21,96	21,96
1,41	10,59	20,19	20,59	21,71	21,71	21,71

Prog(m)	Z(cm)	Hi(cm)	Hf(cm)	F 00:03:27(cm)	F 00:04:27(cm)	F 00:05:27(cm)	F 00:06:27(cm)
1,32	9,88	22,28	23,03				
1,30	9,74	22,24	22,99				
1,19	8,91	22,51	22,56				
1,17	8,75	22,45	22,50				
1,10	8,25	22,05	22,40				
1,04	7,79	21,79	22,04				
0,98	7,35	21,45	21,68				
0,97	7,29	21,59	21,64				
0,92	6,90	21,40	21,25				
0,90	6,75	21,25	21,30				
0,86	6,45	21,75	21,00				
0,81	6,06	21,36	20,81				
0,77	5,78	21,78	20,71				
0,76	5,73	21,73	20,78				
0,72	5,42	21,62	20,47				
0,69	5,16	21,36	20,41				
0,65	4,88	21,58	20,21				
0,62	4,65	21,35	19,78				
0,57	4,31	21,31	19,54				
0,52	3,89	20,89	19,32				
0,46	3,47	20,87	19,00				
0,40	2,98	20,78	18,61				
0,00	0,00	17,90	16,50				

Prog(m)	Z(cm)	F 00:07:27(cm)	F 00:08:27(cm)	F 00:09:27(cm)	F 00:10:27(cm)	F 00:11:27(cm)	F 00:12:27(cm)
1,32	9,88	9,88	17,78	18,68	18,68	18,58	18,68
1,30	9,74		17,64	18,64	18,64	18,64	18,64
1,19	8,91		8,91	18,11	18,21	18,11	18,31
1,17	8,75			17,95	18,15	18,15	18,25
1,10	8,25			8,25	17,85	17,75	18,05
1,04	7,79				17,69	17,59	17,89
0,98	7,35				7,35	17,35	17,75
0,97	7,29					17,19	17,69
0,92	6,90					6,90	17,60
0,90	6,75						17,55
0,86	6,45						6,45
0,81	6,06						
0,77	5,78						
0,76	5,73						
0,72	5,42						
0,69	5,16						
0,65	4,88						
0,62	4,65						
0,57	4,31						
0,52	3,89						
0,46	3,47						
0,40	2,98						
0,00	0,00						

Prog(m)	Z(cm)	F 00:13:27(cm)	F 00:14:27(cm)	F 00:15:27(cm)	F 00:16:27(cm)	F 00:17:43(cm)	F 00:18:34(cm)
1,32	9,88	19,58	19,58	19,58	19,58	19,58	19,58
1,30	9,74	19,54	19,54	19,54	19,54	19,54	19,54
1,19	8,91	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11
1,17	8,75	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05
1,10	8,25	18,75	18,75	18,95	18,95	18,95	18,95
1,04	7,79	18,39	18,39	18,59	18,59	18,59	18,59
0,98	7,35	18,25	18,25	18,25	18,25	18,25	18,25
0,97	7,29	18,19	18,19	18,19	18,19	18,19	18,19
0,92	6,90	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80
0,90	6,75	17,75	17,75	17,85	17,85	17,85	17,85
0,86	6,45	17,55	17,55	17,55	17,55	17,55	17,55
0,81	6,06	17,16	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36
0,77	5,78	5,78	17,18	17,08	17,08	17,08	17,08
0,76	5,73		17,13	17,33	17,33	17,13	17,13
0,72	5,42		5,42	17,02	17,02	17,02	17,02
0,69	5,16			16,56	16,96	16,96	16,96
0,65	4,88			4,88	16,68	16,68	16,68
0,62	4,65				16,65	16,65	16,65
0,57	4,31				4,31	16,31	16,31
0,52	3,89					15,89	15,99
0,46	3,47					3,47	15,57
0,40	2,98						2,98
0,00	0,00						

Prog(m)	Z(cm)	F 00:19:27(cm)	F 00:20:27(cm)	F 00:21:27(cm)	F 00:22:30(cm)	F 00:23:04(cm)
1,32	9,88	19,58	20,10	21,10	21,10	21,10
1,30	9,74	19,54	20,06	21,06	21,06	21,06
1,19	8,91	19,11	19,63	20,63	20,63	20,63
1,17	8,75	19,05	19,57	20,55	20,57	20,57
1,10	8,25	18,95	19,47	20,25	20,47	20,47
1,04	7,79	18,59	19,11	20,11	20,11	20,11
0,98	7,35	18,25	18,75	19,75	19,75	19,75
0,97	7,29	18,19	18,71	19,71	19,71	19,71
0,92	6,90	17,80	18,50	19,32	19,32	19,32
0,90	6,75	17,85	18,55	19,37	19,37	19,37
0,86	6,45	17,55	18,35	19,07	19,07	19,07
0,81	6,06	17,36	17,96	18,88	18,88	18,88
0,77	5,78	17,08	17,78	18,78	18,78	18,78
0,76	5,73	17,13	17,85	18,85	18,85	18,85
0,72	5,42	17,02	17,54	18,54	18,54	18,54
0,69	5,16	16,96	17,48	18,48	18,48	18,48
0,65	4,88	16,68	17,38	18,28	18,28	18,28
0,62	4,65	16,65	17,25	18,15	17,85	17,85
0,57	4,31	16,31	17,01	17,91	17,61	17,61
0,52	3,89	15,99	16,79	17,49	17,39	17,39
0,46	3,47	15,57	16,47	17,17	17,07	17,07
0,40	2,98	15,08	15,58	16,68	16,68	16,68
0,00	0,00	0,00	6,90	10,90	14,50	14,50

ANEXO ENSAYO 6.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hf (cm)	Hi (cm)	F ini (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:04:00 (cm)	F 00:06:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:16:00 (cm)	F 00:28:00 (cm)
5,28	39,56	41,26	41,76								
4,98	37,31	39,31	38,91								
4,68	35,06	36,66	36,66								
4,38	32,81	34,71	34,61								
4,08	30,56	32,16	32,46								
3,97	29,74	31,24	31,84	29,74							
3,79	28,39	29,99	31,99	29,69							
3,64	27,26	29,16	31,96	28,76	27,26						
3,41	25,54	27,54	31,44	28,04	27,34						
3,26	24,41	26,11	30,61	27,71	27,21	24,41					
3,18	23,81	25,61	30,51	27,41	26,71	25,01	23,81				
3,03	22,69	24,19	29,79	26,99	26,29	25,29	24,69				
2,38	17,81	19,61	25,21	23,71	21,71	20,71	20,21				
2,29	17,14	18,74	24,84	23,54	21,34	20,44	19,74	17,14	17,14		
2,14	16,01	17,91	24,21	22,71	21,11	20,01	18,91	17,91	17,61		
1,97	14,74	17,34	23,74	22,34	20,64	19,64	18,64	18,14	17,34	14,74	
1,88	14,10	16,90	23,50	22,00	20,00	19,40	18,10	17,50	16,90	15,70	14,10
1,68	12,60	17,80	22,60	21,00	19,90	19,00	18,50	17,40	16,70	16,00	16,00
1,38	10,35	17,35	21,75	20,45	19,25	18,75	17,75	17,25	16,45	15,75	15,75
1,12	8,40	17,80	20,50	19,20	18,00	18,00	17,50	16,80	16,00	15,20	15,20
1,08	8,10	18,00	20,20	19,00	18,00	18,00	17,40	16,70	15,70	15,70	15,70
0,99	7,43	17,83	19,83	18,63	17,83	17,83	16,63	16,63	15,53	15,53	15,53

ANEXO ENSAYO 7.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F00:00:44 (cm)	F00:01:14 (cm)	F00:01:44 (cm)	F00:02:14 (cm)	F 00:02:44 (cm)	F00:03:14 (cm)
6,59	49,39	51,13	51,09						
6,45	48,34	50,18	50,34						
6,15	46,09	47,88	47,69						
5,85	43,84	45,98	45,74						
5,55	41,59	43,63	43,19						
5,23	39,19	41,13	40,69						
4,93	36,94	38,78	38,54						
4,58	34,35	36,09	36,25						
4,30	32,21	34,05	34,21						
4,14	31,01	32,75	32,75						
4,08	30,60	32,44	32,44						
3,75	28,09	29,83	29,83						
3,58	26,81	28,65	28,65						
3,54	26,54	28,28	28,28						
3,16	23,69	25,63	25,63						
3,13	23,51	25,55	25,55						
2,38	17,88	19,72	21,33						
2,34	17,58	19,52	21,38						
2,31	17,32	19,16	21,12			17,32	17,32	17,32	17,32

Prog (m)	Z (cm)	F00:03:44 (cm)	F00:05:14 (cm)	F00:06:24 (cm)	F00:08:24 (cm)	F00:09:24 (cm)	F00:13:24 (cm)	F00:20:24 (cm)
6,59	49,39							
6,45	48,34							
6,15	46,09							
5,85	43,84							
5,55	41,59							
5,23	39,19							
4,93	36,94							
4,58	34,35							
4,30	32,21							
4,14	31,01							
4,08	30,60							
3,75	28,09							
3,58	26,81							
3,54	26,54							
3,16	23,69				23,69	23,69	23,69	23,69
3,13	23,51		23,51	23,51	23,81	23,81	23,81	23,81
2,38	17,88		18,18	17,88	19,08	19,18	19,48	19,78
2,34	17,58	17,58	18,08	17,88	18,88	18,98	19,28	19,48
2,31	17,32	17,82	18,02	17,82	18,72	18,82	19,12	19,32

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F 00:00:44 (cm)	F 00:01:14 (cm)	F00:01:44 (cm)	F 00:02:14 (cm)	F 00:02:44 (cm)	F 00:03:14 (cm)
1,71	12,82	14,96	18,02	12,82	12,82	14,42	14,42	14,42	14,42
1,49	11,17	13,41	16,67	11,77	11,77	13,27	13,27	13,27	13,27
1,13	8,47	12,67	14,97	10,30	10,27	11,47	11,47	11,47	11,47
0,85	6,37	11,97	13,47	9,30	9,27	10,37	10,37	10,37	10,37
0,83	6,22	12,12	13,32	9,30	9,22	10,23	10,23	10,30	10,30
0,76	5,73	12,13	13,03	9,03	8,90	10,10	10,10	10,10	10,10
0,74	5,58	12,08	12,78	8,88	8,90	10,00	10,00	10,00	10,00
0,72	5,43	12,13	12,93	5,43	8,83	10,10	10,10	10,10	10,10
0,58	4,34	11,84	12,24		8,44	9,60	9,60	9,60	9,60
0,52	3,93	12,03	12,03		3,93	9,50	9,50	9,50	9,50
0,39	2,92	12,22	11,42			3,92	9,00	9,00	9,00
0,35	2,66	12,16	11,46			2,66	9,00	8,90	8,90
0,25	1,87	11,77	10,97				4,17	8,70	8,70
0,19	1,46	11,56	10,56				1,46	8,60	8,46
0,14	1,03	11,53	10,33					1,03	8,43
0,11	0,84	11,34	10,24						8,24
0,05	0,35	11,15	10,55						3,90
0,03	0,24	11,34	10,94						2,54
0,00	0,00	11,40	11,40						0,30

Prog (m)	Z (cm)	F 00:03:44 (cm)	F 00:05:14 (cm)	F00:06:24 (cm)	F 00:08:24 (cm)	F 00:09:24 (cm)	F 00:13:24 (cm)	F 00:20:24 (cm)
1,71	12,82	14,32	14,32	15,02	15,32	15,72	16,02	16,32
1,49	11,17	13,27	13,07	13,77	14,07	14,37	14,57	15,07
1,13	8,47	11,47	11,47	11,97	12,37	12,87	13,07	13,47
0,85	6,37	10,37	10,37	11,07	11,37	11,67	11,77	11,87
0,83	6,22	10,30	10,30	11,02	11,32	11,62	11,72	11,82
0,76	5,73	10,10	10,10	10,73	11,03	11,33	11,33	11,43
0,74	5,58	10,00	10,00	10,68	11,08	11,28	11,28	11,28
0,72	5,43	10,10	10,10	10,63	11,03	11,23	11,23	11,33
0,58	4,34	9,60	9,60	10,24	10,54	10,54	10,54	10,74
0,52	3,93	9,50	9,50	10,03	10,33	10,33	10,33	10,43
0,39	2,92	9,00	9,00	9,70	9,82	9,82	9,817	9,92
0,35	2,66	8,90	8,90	9,60	9,76	9,76	9,75	9,86
0,25	1,87	8,70	8,70	9,23	9,37	9,36	9,37	9,47
0,19	1,46	8,60	8,60	9,10	9,16	9,15	9,16	9,26
0,14	1,03	8,43	8,43	8,93	8,92	8,93	8,93	8,93
0,11	0,84	8,24	8,24	8,74	8,74	8,74	8,74	8,74
0,05	0,35	7,75	7,75	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35
0,03	0,24	5,94	5,94	8,24	8,24	8,24	8,24	8,24
0,00	0,00	3,90	3,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90

ANEXO ENSAYO 8.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F Ini (cm)	F 00:01:30 (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:04:00 (cm)	F 00:05:00 (cm)
3,69	27,68	29,48	29,48						
3,56	26,70	28,60	28,60						
3,45	25,88	27,68	27,68						
3,40	25,50	27,40	27,40						
3,20	23,98	26,18	25,98						
3,16	23,72	25,82	25,62						
3,15	23,64	25,84	25,64	23,64					
3,05	22,89	25,39	24,99	23,89					
2,93	21,99	24,60	23,99	23,39					
2,90	21,77	24,58	23,77	23,37					
2,89	21,69	24,40	23,79	23,19					
2,85	21,39	24,20	23,59	22,99					
2,82	21,13	24,04	23,23	22,83					
2,75	20,64	23,45	22,64	22,24	20,64				
2,58	19,37	22,48	21,27	21,27	20,87				
2,48	18,62	21,83	20,42	20,62	20,42				
2,44	18,32	21,43	20,22	20,22	20,22				
2,38	17,85	21,06	20,05	19,85	19,75				
2,29	17,18	20,49	19,28	19,28	19,48				
2,25	16,84	20,35	18,74	19,14	19,04				
2,18	16,31	19,92	18,41	18,71	18,51	16,31			
2,12	15,86	19,67	17,86	18,46	18,26	17,26			

Prog (m)	Z (cm)	F 00:06:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:13:00(cm)
3,69	27,68				
3,56	26,70				
3,45	25,88				
3,40	25,50				
3,20	23,98				
3,16	23,72				
3,15	23,64				
3,05	22,89				
2,93	21,99				
2,90	21,77				
2,89	21,69				
2,85	21,39				
2,82	21,13				
2,75	20,64				
2,58	19,37				
2,48	18,62				
2,44	18,32				
2,38	17,85				
2,29	17,18				
2,25	16,84				
2,18	16,31				
2,12	15,86				

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F Ini (cm)	F 00:01:30 (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:04:00 (cm)	F 00:05:00 (cm)
2,10	15,71	19,62	17,61	18,41	18,31	17,21			
2,03	15,19	19,20	17,29	17,99	17,69	17,09	15,19		
2,01	15,04	19,15	17,24	17,94	17,74	17,04	15,34		
1,99	14,89	19,10	16,99	17,89	17,69	16,99	15,49		
1,83	13,73	18,14	15,73	16,93	16,83	16,53	15,33		
1,80	13,46	17,97	15,36	16,76	16,66	16,46	15,16		
1,77	13,24	17,85	14,84	16,64	16,64	16,24	15,04		
1,76	13,16	17,87	14,86	16,66	16,66	16,16	15,06	13,16	
1,68	12,60	17,31	14,80	16,10	16,10	15,80	14,80	13,00	
1,60	11,96	16,87	14,26	15,66	15,66	15,56	14,26	12,86	11,96
1,49	11,14	16,25	13,24	15,04	15,04	15,04	14,04	12,64	11,84
1,42	10,65	15,96	12,95	14,75	14,75	14,75	13,85	12,35	11,95
1,37	10,28	15,79	12,48	14,58	14,58	14,58	13,58	12,18	11,78
1,35	10,13	15,74	12,43	14,53	14,53	14,53	13,53	12,13	11,83
1,27	9,53	15,44	11,73	14,23	14,23	14,23	13,23	11,93	11,53
1,16	8,70	14,91	12,20	13,70	13,70	13,70	12,70	11,50	11,10
1,05	7,88	14,49	11,98	13,28	13,28	13,28	12,18	11,28	10,88
0,75	5,63	12,74	11,53	11,53	11,53	11,53	11,33	10,43	10,13
0,64	4,80	12,41	11,20	11,20	11,20	11,20	10,90	10,10	9,70
0,37	2,78	11,18	11,18	9,98	9,98	9,98	9,78	9,28	8,98
0,07	0,53	9,93	10,33	8,43	8,43	8,43	8,53	8,33	7,93
0,04	0,26	10,26	10,26	8,26	8,26	8,26	7,66	7,16	6,16
0,00	0,00	10,90	10,90	5,90	5,90	5,90	4,70	4,60	4,40

Prog (m)	Z (cm)	F 00:06:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:10:00 (cm)	F 00:13:00
2,10	15,71				
2,03	15,19				
2,01	15,04				
1,99	14,89				
1,83	13,73				
1,80	13,46				
1,77	13,24				
1,76	13,16				
1,68	12,60				
1,60	11,96				
1,49	11,14	11,14			
1,42	10,65	11,25	10,65		
1,37	10,28	11,08	10,88		
1,35	10,13	11,03	10,93		
1,27	9,53	11,13	11,03	9,53	9,53
1,16	8,70	11,00	10,80	9,90	9,90
1,05	7,88	10,68	10,38	10,18	10,18
0,75	5,63	10,03	9,73	9,73	9,73
0,64	4,80	9,70	9,50	9,50	9,50
0,37	2,78	8,88	8,68	8,68	8,68
0,07	0,53	7,93	7,93	7,93	7,93
0,04	0,26	6,16	6,16	6,16	6,16
0,00	0,00	4,40	4,40	4,40	4,40

ANEXO ENSAYO 9.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F 00:13:00 (cm)	F 00:11:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:06:00 (cm)	F 00:05:12 (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:04:00 (cm)
3,59	26,92	28,92	28,82	27,52						
3,36	25,21	27,31	27,61	26,11						
3,06	22,96	25,16	25,86	24,46	22,96					
2,85	21,35	23,45	24,75	23,45	22,65					
2,76	20,71	22,71	24,41	22,91	22,31					
2,58	19,32	21,62	23,22	21,72	21,22	19,32				
2,56	19,17	21,27	23,07	21,67	21,07	19,67				
2,51	18,84	20,84	23,04	21,44	20,84	19,74	18,84			
2,26	16,93	19,03	21,83	20,03	19,83	18,93	18,13	16,93		
2,10	15,73	17,53	20,63	19,23	19,03	18,53	17,73	16,63		
1,96	14,68	16,98	20,18	18,58	18,38	17,98	17,18	16,18	14,68	14,68
1,74	13,07	15,17	19,17	17,47	17,37	17,07	16,37	15,47	15,17	15,17
1,31	9,80	11,80	16,90	15,20	15,10	15,10	14,40	13,60	12,70	12,70
1,28	9,58	11,68	16,68	15,08	14,98	14,98	14,28	13,48	12,58	12,58
0,94	7,03	12,53	14,43	13,23	13,33	13,33	12,23	12,23	10,83	10,83
0,91	6,80	12,80	14,20	13,10	13,20	13,20	12,10	12,10	10,70	10,70
0,78	5,88	12,78	13,68	12,38	12,48	12,48	11,48	11,48	10,28	10,28
0,76	5,68	12,68	13,48	12,28	12,38	12,38	11,38	11,38	10,18	10,18
0,70	5,27	12,77	13,67	12,07	12,07	12,07	11,17	11,17	9,87	9,87
0,59	4,43	12,33	12,83	11,23	11,33	11,33	10,53	10,53	9,73	9,73
0,47	3,56	12,16	12,16	10,56	10,56	10,56	9,96	9,96	9,46	9,46
0,46	3,43	12,03	12,03	10,33	10,43	10,43	9,93	9,93	9,43	9,43
0,40	2,99	12,09	11,59	10,09	9,99	9,99	9,59	9,59	9,29	9,29
0,38	2,84	11,94	11,44	9,84	9,84	9,84	9,54	9,54	9,24	9,24
0,28	2,13	12,13	10,73	9,23	9,23	9,23	9,03	9,03	8,93	8,93

Prog (m)	Z (cm)	F03:30:00 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F00:02:30 (cm)	F00:02:00 (cm)	F 00:01:30 (cm)	F00:01:00 (cm)	F00:00:20 (cm)	F00:00:10 (cm)
3,59	26,92								
3,36	25,21								
3,06	22,96								
2,85	21,35								
2,76	20,71								
2,58	19,32								
2,56	19,17								
2,51	18,84								
2,26	16,93								
2,10	15,73								
1,96	14,68	14,68	14,68	14,68	14,68	14,68	14,68		
1,74	13,07	14,17	14,17	14,17	14,17	14,17	14,17		
1,31	9,80	12,20	12,20	12,20	12,20	12,10	12,10	9,80	9,80
1,28	9,58	12,08	12,08	12,08	12,08	11,98	11,98	11,08	11,08
0,94	7,03	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	9,63	9,63
0,91	6,80	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	9,50	6,80
0,78	5,88	9,58	9,58	9,58	9,58	9,68	9,68	8,78	
0,76	5,68	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	5,68	
0,70	5,27	9,37	9,37	9,37	9,37	9,37	9,37		
0,59	4,43	8,93	8,93	8,93	8,93	8,93	4,43		
0,47	3,56	8,46	8,46	8,46	8,46	8,26			
0,46	3,43	8,43	8,43	8,43	8,43	3,43			
0,40	2,99	8,29	8,29	8,29	8,29				
0,38	2,84	8,34	8,34	8,34	2,84				
0,28	2,13	8,03	8,03	8,03					

Prog (m)	Z (cm)	F 03:30:00 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:02:30 (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:01:30 (cm)	F 00:01:00 (cm)	F 00:00:20 (cm)	F 00:00:10 (cm)
0,27	2,02	8,12	8,12	2,02					
0,18	1,31	7,71	7,71						
0,16	1,19	7,69	1,19						
0,08	0,57	7,37							
0,06	0,48	5,88							
0,02	0,13	1,53							
0,00	0,00	0,00							

ANEXO ENSAYO 10.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z(cm)	Hi(cm)	Hf(cm)	H 00:19:00(cm)	H 00:06:00(cm)	F 00:03:00(cm)	F 00:03:30(cm)
2,98	29,77	31,27	32,37	31,47	32,57		
2,84	28,37	30,07	30,97	30,87	30,17		
2,79	27,92	29,62	30,62	31,02	30,32		
2,76	27,62	29,22	30,22	30,92	29,62		
2,58	25,82	27,42	28,72	29,82	27,82		
2,51	25,12	26,82	28,02	29,12	28,02		
2,45	24,48	26,38	26,38	28,88	26,88		
2,22	22,19	23,89	24,09	27,29	24,69	22,19	22,19
1,92	19,19	20,69	24,29	25,49	24,09	19,99	20,79
1,79	17,94	19,54	24,14	24,94	23,94	19,54	20,24
1,75	17,54	19,14	23,74	24,94	23,74	19,64	20,14
1,38	13,84	18,24	21,24	23,44	21,34	16,44	18,24
1,35	13,49	18,79	21,39	23,39	21,39	16,19	18,29
1,31	13,09	18,69	21,09	23,39	20,79	13,09	18,09
1,20	12,03	19,13	20,13	22,73	20,43		17,33
1,11	11,09	19,29	19,79	22,49	20,29		10,99
1,08	10,83	19,23	19,83	22,23	20,13		
0,99	9,93	18,83	19,83	21,53	20,03		
0,99	9,89	19,19	19,89	21,69	19,99		
0,89	8,93	19,23	19,13	20,73	19,33		
0,88	8,80	19,40	19,30	20,80	19,50		
0,85	8,48	19,38	19,08	20,48	19,38		
0,81	8,08	19,08	18,78	20,18	19,48		

Prog (m)	Z(cm)	F 00:04:00(cm)	F 00:04:30(cm)	F 00:05:00(cm)	F 00:05:30(cm)	F 00:06:00(cm)	F 00:06:30(cm)
2,98	29,77						
2,84	28,37						
2,79	27,92						
2,76	27,62						
2,58	25,82						
2,51	25,12						
2,45	24,48						
2,22	22,19	22,19	22,19	22,19	22,19	22,19	22,19
1,92	19,19	20,79	20,69	19,99	19,99	22,59	22,59
1,79	17,94	20,24	20,04	19,54	19,54	22,44	22,44
1,75	17,54	20,14	20,04	19,64	19,64	22,14	22,14
1,38	13,84	18,24	18,54	17,74	17,74	19,54	19,54
1,35	13,49	18,29	18,49	17,89	17,89	19,49	19,49
1,31	13,09	18,09	18,39	18,09	18,09	19,49	19,49
1,20	12,03	17,93	17,93	17,93	17,93	18,83	18,83
1,11	11,09	17,39	17,69	17,39	17,39	18,49	18,49
1,08	10,83	17,43	17,83	17,73	17,73	18,73	18,73
0,99	9,93	9,93	17,53	17,53	17,53	18,53	18,53
0,99	9,89		17,59	17,59	17,59	18,59	18,59
0,89	8,93		8,93	17,23	17,03	17,73	17,73
0,88	8,80			17,20	17,20	17,60	17,60
0,85	8,48			8,38	17,18	17,38	17,38
0,81	8,08				16,98	17,18	17,18

Prog (m)	Z(cm)	F 00:13:30(cm)	F 00:14:00(cm)	F 00:14:30(cm)	F 00:15:00(cm)	F 00:15:30(cm)	F 00:15:40(cm)	F 00:22:00(cm)
2,98	29,77						29,77	29,77
2,84	28,37						29,37	29,37
2,79	27,92						29,22	29,22
2,76	27,62						29,12	29,12
2,58	25,82						28,22	28,22
2,51	25,12						27,62	27,62
2,45	24,48						27,38	27,38
2,22	22,19	22,19	22,19	22,19	22,19	22,19	26,09	26,09
1,92	19,19	22,59	22,59	22,59	22,59	22,59	23,99	23,99
1,79	17,94	22,44	22,44	22,44	22,44	22,44	23,54	23,54
1,75	17,54	22,14	22,14	22,14	22,14	22,14	23,14	23,14
1,38	13,84	19,54	19,54	19,54	19,54	19,54	22,24	22,24
1,35	13,49	19,49	19,49	19,49	19,49	19,49	22,19	22,19
1,31	13,09	19,49	19,49	19,49	19,49	19,49	21,89	21,89
1,20	12,03	18,83	18,83	18,83	18,83	18,83	20,93	20,93
1,11	11,09	18,49	18,49	18,49	18,49	18,49	20,59	20,59
1,08	10,83	18,73	18,73	18,73	18,73	18,73	20,53	20,53
0,99	9,93	18,53	18,53	18,53	18,53	18,53	20,03	20,03
0,99	9,89	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	20,29	20,29
0,89	8,93	17,73	17,73	17,73	17,73	17,73	19,33	19,33
0,88	8,80	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	19,40	19,40
0,85	8,48	17,38	17,38	17,38	17,38	17,38	19,18	19,18
0,81	8,08	17,18	17,18	17,18	17,18	17,18	19,08	19,08

Prog (m)	Z(cm)	Hi(cm)	Hf(cm)	H 00:19:00(cm)	H 00:06:00(cm)	F 00:03:00(cm)	F 00:03:30(cm)	F 00:04:00(cm)
0,78	7,78	18,98	18,78	20,08	19,18			
0,76	7,62	19,02	18,62	20,12	19,02			
0,73	7,27	18,67	18,77	19,77	18,67			
0,71	7,09	18,99	18,69	20,09	18,99			
0,69	6,85	18,75	18,75	19,85	18,85			
0,67	6,69	18,99	18,79	19,99	18,99			
0,64	6,44	18,74	18,74	19,74	18,74			
0,64	6,39	18,99	18,89	19,89	18,99			
0,60	6,04	18,64	19,14	19,54	18,64			
0,60	6,00	18,70	19,10	19,50	18,70			
0,56	5,60	18,30	18,70	19,10	18,30			
0,53	5,30	18,50	18,70	19,10	18,50			
0,53	5,25	18,55	18,65	19,05	18,45			
0,49	4,90	18,40	18,30	18,70	18,30			
0,49	4,90	18,50	18,30	18,70	18,30			
0,46	4,59	18,29	17,99	18,39	17,99			
0,46	4,55	18,35	17,95	18,35	17,95			
0,44	4,35	18,35	18,25	18,65	18,25			
0,41	4,13	18,43	18,03	18,43	18,03			
0,39	3,94	18,34	17,84	18,24	17,94			
0,38	3,84	18,34	17,74	18,14	17,84			
0,36	3,62	18,32	17,92	18,32	18,12			
0,35	3,49	18,29	17,79	18,19	17,99			
0,33	3,32	18,22	17,72	18,12	17,82			

Prog (m)	Z(cm)	F 00:04:30(cm)	F 00:05:00(cm)	F 00:05:30(cm)	F 00:06:00(cm)	F 00:06:30(cm)	F 00:07:00(cm)
0,78	7,78			7,68	16,98	16,98	16,98
0,76	7,62				16,92	16,92	16,92
0,73	7,27				7,17	16,57	16,57
0,71	7,09					16,39	16,39
0,69	6,85					6,85	16,25
0,67	6,69						16,29
0,64	6,44						6,44
0,64	6,39						
0,60	6,04						
0,60	6,00						
0,56	5,60						
0,53	5,30						
0,53	5,25						
0,49	4,90						
0,49	4,90						
0,46	4,59						
0,46	4,55						
0,44	4,35						
0,41	4,13						
0,39	3,94						
0,38	3,84						
0,36	3,62						
0,35	3,49						
0,33	3,32						

Prog (m)	Z(cm)	F 00:07:30(cm)	F 00:08:00(cm)	F 00:08:30(cm)	F 00:09:00(cm)	F 00:09:30(cm)	F 00:10:00(cm)
0,78	7,78	16,98	16,98	16,98	16,98	16,98	16,98
0,76	7,62	16,92	16,92	16,92	16,92	16,92	16,92
0,73	7,27	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57
0,71	7,09	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39
0,69	6,85	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25
0,67	6,69	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29
0,64	6,44	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14
0,64	6,39	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29
0,60	6,04	6,04	15,94	15,94	15,94	15,94	15,94
0,60	6,00		16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
0,56	5,60		5,60	15,60	16,10	16,10	16,10
0,53	5,30			5,30	15,90	15,90	15,90
0,53	5,25				15,95	15,95	15,95
0,49	4,90				4,90	15,60	15,60
0,49	4,90					15,80	15,80
0,46	4,59					4,59	15,49
0,46	4,55						15,55
0,44	4,35						4,35
0,41	4,13						
0,39	3,94						
0,38	3,84						
0,36	3,62						
0,35	3,49						
0,33	3,32						

Prog (m)	Z(cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30(cm)	F 00:12:00(cm)	F 00:12:30(cm)	F 00:13:00(cm)	F 00:13:30(cm)
0,78	7,78	16,98	16,98	16,98	16,98	16,98	16,98
0,76	7,62	16,92	16,92	16,92	16,92	16,92	16,92
0,73	7,27	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57
0,71	7,09	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39
0,69	6,85	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25
0,67	6,69	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29
0,64	6,44	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14
0,64	6,39	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29	16,29
0,60	6,04	15,94	15,94	15,94	15,94	15,94	15,94
0,60	6,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
0,56	5,60	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
0,53	5,30	15,90	15,90	15,90	15,90	15,90	15,90
0,53	5,25	15,95	15,95	15,95	15,95	15,95	15,95
0,49	4,90	15,60	15,60	15,60	15,60	15,60	15,60
0,49	4,90	15,80	15,80	15,80	15,80	15,80	15,80
0,46	4,59	15,49	15,49	15,49	15,49	15,49	15,49
0,46	4,55	15,55	15,55	15,55	15,55	15,55	15,55
0,44	4,35	15,35	15,35	15,35	15,35	15,35	15,35
0,41	4,13	15,33	15,33	15,33	15,33	15,33	15,33
0,39	3,94	3,94	15,14	15,14	15,14	15,14	15,14
0,38	3,84		15,24	15,24	15,24	15,24	15,24
0,36	3,62		9,02	15,22	15,22	15,22	15,22
0,35	3,49		3,49	15,29	15,29	15,29	15,29
0,33	3,32			11,02	15,42	15,42	15,42

Prog (m)	Z(cm)	F 00:14:00(cm)	F 00:14:30(cm)	F 00:15:00(cm)	F 00:15:30(cm)	F 00:15:40(cm)	F 00:22:00(cm)
0,78	7,78	16,98	16,98	16,98	16,98	18,98	18,98
0,76	7,62	16,92	16,92	16,92	16,92	18,82	18,82
0,73	7,27	16,57	16,57	16,57	16,57	18,47	18,47
0,71	7,09	16,39	16,39	16,39	16,39	18,39	18,39
0,69	6,85	16,25	16,25	16,25	16,25	18,25	18,25
0,67	6,69	16,29	16,29	16,29	16,29	18,29	18,29
0,64	6,44	16,14	16,14	16,14	16,14	18,04	18,04
0,64	6,39	16,29	16,29	16,29	16,29	18,29	18,29
0,60	6,04	15,94	15,94	15,94	15,94	17,94	17,94
0,60	6,00	16,00	16,00	16,00	16,00	17,90	17,90
0,56	5,60	16,10	16,10	16,10	16,10	17,50	17,50
0,53	5,30	15,90	15,90	15,90	15,90	17,30	17,30
0,53	5,25	15,95	15,95	15,95	15,95	17,25	17,25
0,49	4,90	15,60	15,60	15,60	15,60	17,10	17,10
0,49	4,90	15,80	15,80	15,80	15,80	17,10	17,10
0,46	4,59	15,49	15,49	15,49	15,49	16,49	17,19
0,46	4,55	15,55	15,55	15,55	15,55	16,45	17,15
0,44	4,35	15,35	15,35	15,35	15,35	16,25	16,95
0,41	4,13	15,33	15,33	15,33	15,33	16,43	16,73
0,39	3,94	15,14	15,14	15,14	15,14	16,24	16,84
0,38	3,84	15,24	15,24	15,24	15,24	16,24	16,74
0,36	3,62	15,22	15,22	15,22	15,22	16,02	16,62
0,35	3,49	15,29	15,29	15,29	15,29	15,99	16,49
0,33	3,32	15,42	15,42	15,42	15,42	15,92	16,72

Prog (m)	Z(cm)	Hi(cm)	Hf(cm)	H 00:19:00(cm)	H 00:06:00(cm)	F 00:03:00(cm)	F 00:03:30(cm)	F 00:04:00(cm)
0,31	3,10	18,00	17,50	17,90	18,10			
0,29	2,89	18,09	17,59	17,69	18,29			
0,28	2,75	18,15	17,45	17,55	18,15			
0,23	2,32	17,82	17,22	17,12	17,72			
0,22	2,15	17,75	17,05	16,95	17,55			
0,20	1,98	17,68	16,88	16,78	17,68			
0,19	1,92	17,62	16,82	16,72	17,62			
0,18	1,77	17,57	16,67	16,57	17,47			
0,13	1,26	17,26	16,16	16,16	16,96			
0,09	0,90	17,00	16,50	15,80	17,00			
0,07	0,65	16,75	16,25	15,55	16,75			
0,02	0,20	16,30	15,80	15,10	16,30			
0,00	0,00	16,10	15,60	14,90	16,10			

Prog (m)	Z(cm)	F 00:04:30(cm)	F 00:05:00(cm)	F 00:05:30(cm)	F 00:06:00(cm)	F 00:06:30(cm)	F 00:07:00(cm)
0,31	3,10						
0,29	2,89						
0,28	2,75						
0,23	2,32						
0,22	2,15						
0,20	1,98						
0,19	1,92						
0,18	1,77						
0,13	1,26						
0,09	0,90						
0,07	0,65						
0,02	0,20						
0,00	0,00						

Prog (m)	Z(cm)	F 00:07:30(cm)	F 00:08:00(cm)	F 00:08:30(cm)	F 00:09:00(cm)	F 00:09:30(cm)	F 00:10:00(cm)
0,31	3,10						
0,29	2,89						
0,28	2,75						
0,23	2,32						
0,22	2,15						
0,20	1,98						
0,19	1,92						
0,18	1,77						
0,13	1,26						
0,09	0,90						
0,07	0,65						
0,02	0,20						
0,00	0,00						

Prog (m)	Z(cm)	F 00:10:30(cm)	F 00:11:30(cm)	F 00:12:00(cm)	F 00:12:30(cm)	F 00:13:00(cm)	F 00:13:30(cm)
0,31	3,10						
0,29	2,89			2,89	12,59	15,39	15,39
0,28	2,75				10,85	15,35	15,35
0,23	2,32				4,82	12,82	15,12
0,22	2,15				2,15	11,95	15,05
0,20	1,98					10,88	13,78
0,19	1,92					10,62	13,52
0,18	1,77					9,77	12,57
0,13	1,26					7,06	9,76
0,09	0,90					5,28	7,90
0,07	0,65					3,95	6,45
0,02	0,20					1,60	4,10
0,00	0,00					0,40	2,80

Prog (m)	Z(cm)	F 00:14:00(cm)	F 00:14:30(cm)	F 00:15:00(cm)	F 00:15:30(cm)	F 00:15:40(cm)	F 00:22:00(cm)
0,31	3,10	15,30	15,30	15,30	15,30	15,80	16,50
0,29	2,89	15,39	15,39	15,39	15,39	15,59	16,39
0,28	2,75	15,35	15,35	15,35	15,35	15,65	16,25
0,23	2,32	15,12	15,22	15,12	15,12	15,22	15,82
0,22	2,15	15,05	15,05	15,05	15,05	15,55	15,65
0,20	1,98	14,98	14,98	14,98	14,98	15,38	15,68
0,19	1,92	14,92	14,92	14,92	14,92	15,42	15,62
0,18	1,77	15,07	15,07	15,07	15,07	15,47	15,77
0,13	1,26	12,36	14,86	14,86	14,86	15,26	15,26
0,09	0,90	10,40	12,80	14,70	14,70	15,10	15,10
0,07	0,65	9,15	11,45	14,45	14,45	14,95	14,85
0,02	0,20	6,60	8,90	11,50	14,50	14,60	14,50
0,00	0,00	5,50	7,70	10,40	14,90	14,90	14,90

ANEXO ENSAYO 11.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

ANEXO ENSAYO 12.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F 00:3:00 (cm)	F 00:03:30 (cm)	F 00:04:00 (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:05:00 (cm)	F 00:05:30 (cm)
1,57	15,70	17,20	18,90						
1,21	12,09	13,69	15,59						
1,05	10,49	12,19	14,39						
0,88	8,79	11,89	13,79					8,79	8,79
0,79	7,89	11,79	13,39	7,89	7,89	7,89	7,89	9,49	9,49
0,57	5,74	11,54	12,24	7,14	7,44	7,84	8,74	9,04	9,04
0,52	5,24	11,54	12,14	7,04	7,34	7,74	8,64	8,94	8,94
0,40	4,04	11,34	11,44	6,54	7,14	7,64	8,34	8,64	8,64
0,27	2,74	11,24	10,94	6,14	6,84	7,34	7,94	8,24	8,24
0,21	2,07	11,17	10,47	5,87	6,57	7,17	7,77	8,07	8,07
0,18	1,77	11,17	10,37	1,77	6,47	7,07	7,67	7,87	7,97
0,17	1,74	11,24	10,44		5,74	7,14	7,74	7,94	8,04
0,16	1,61	11,21	10,51		1,61	7,11	7,71	7,91	8,11
0,15	1,47	11,17	10,57			1,47	7,67	7,87	8,07
0,13	1,28	11,18	10,48				1,28	7,78	8,08
0,12	1,15	11,35	10,45					7,85	8,05
0,10	1,04	11,44	10,44					1,04	8,04
0,09	0,88	11,58	10,48						8,08
0,08	0,80	11,60	10,50						0,80
0,06	0,63	11,63	10,53						
0,05	0,50	11,70	10,60						
0,04	0,39	11,69	10,59						
0,03	0,28	11,78	10,58						
0,02	0,20	11,80	10,70						
0,00	0,00	11,70	11,20						

Prog (m)	Z (cm)	F 00:06:00 (cm)	F 00:06:30 (cm)	F 00:07:00 (cm)	F 00:08:00 (cm)	F 00:09:00 (cm)	F 00:11:00 (cm)	F 00:12:00 (cm)	F 00:25:00 (cm)
1,57	15,70							17,80	17,80
1,21	12,09					12,09	12,09	14,00	14,00
1,05	10,49		10,49	10,49	10,49	12,49	12,99	13,09	13,09
0,88	8,79	8,79	10,39	10,39	10,99	11,79	11,89	12,39	12,39
0,79	7,89	9,49	9,79	10,09	10,69	11,69	11,69	11,79	11,79
0,57	5,74	9,04	9,04	9,04	9,94	10,64	10,64	10,64	10,64
0,52	5,24	8,94	8,94	8,94	9,74	10,54	10,54	10,54	10,54
0,40	4,04	8,64	8,64	8,64	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04
0,27	2,74	8,34	8,34	8,34	9,74	9,74	9,74	9,74	9,74
0,21	2,07	8,27	8,27	8,27	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57
0,18	1,77	8,17	8,17	8,17	9,47	9,47	9,47	9,47	9,47
0,17	1,74	8,14	8,14	8,14	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54
0,16	1,61	8,21	8,21	8,21	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51
0,15	1,47	8,17	8,17	8,17	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57
0,13	1,28	8,18	8,18	8,18	9,48	9,48	9,48	9,48	9,48
0,12	1,15	8,15	8,15	8,15	9,45	9,45	9,45	9,45	9,45
0,10	1,04	8,14	8,14	8,14	9,44	9,44	9,44	9,44	9,44
0,09	0,88	8,18	8,18	8,18	9,48	9,48	9,48	9,48	9,48
0,08	0,80	8,20	8,20	8,20	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50
0,06	0,63	8,33	8,33	8,33	9,43	9,43	9,43	9,43	9,43
0,05	0,50	0,50	8,36	8,36	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40
0,04	0,39		8,39	8,39	9,39	9,39	9,39	9,39	9,39
0,03	0,28		0,28	8,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38
0,02	0,20			8,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40
0,00	0,00			2,70	6,50	6,50	6,50	8,10	8,10

ANEXO ENSAYO 13.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F ini (cm)	F 00:01:00 (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:02:30 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:04:00 (cm)
1,57	15,67	18,17	17,37	16,27					
1,36	13,57	16,37	15,17	15,37	13,57				
1,25	12,54	15,84	14,24	14,94	14,14	12,54			
1,16	11,62	15,52	13,22	14,42	13,52	12,92	11,62		
1,11	11,06	15,06	12,76	14,16	13,36	12,86	12,46	11,06	
1,08	10,81	15,01	12,51	14,21	13,21	12,71	12,31	12,21	10,81
0,99	9,91	14,31	11,61	13,51	12,81	12,21	11,81	11,81	11,51
0,92	9,21	13,81	10,91	13,11	12,31	11,81	11,31	11,31	11,31
0,91	9,06	13,76	10,66	12,96	12,36	11,76	11,26	11,16	11,16
0,88	8,76	13,66	10,46	12,76	12,06	11,56	11,06	11,06	11,06
0,85	8,53	13,43	10,13	12,63	11,93	11,43	10,93	10,93	10,93
0,84	8,35	13,55	10,05	12,75	11,85	11,35	10,85	10,85	10,85
0,83	8,25	13,45	10,25	12,65	11,75	11,35	10,85	10,85	10,85
0,79	7,88	13,48	10,48	12,58	11,78	11,08	10,78	10,78	10,78
0,74	7,43	13,23	10,43	12,33	11,83	10,93	10,73	10,73	10,73
0,40	4,03	11,43	10,63	10,33	10,33	9,73	9,73	9,43	9,43
0,29	2,93	10,83	10,83	9,53	9,53	9,33	9,33	9,03	9,03
0,18	1,83	10,53	10,53	9,23	9,23	8,93	8,93	8,83	8,83
0,08	0,83	9,83	9,83	8,73	8,63	8,53	8,53	8,63	8,63
0,07	0,67	9,77	9,77	8,57	8,57	8,47	8,57	8,57	8,57
0,04	0,42	9,72	9,72	8,32	8,32	8,32	8,32	5,92	5,92
0,04	0,37	9,77	9,77	6,57	6,57	6,57	6,57	5,27	5,27
0,00	0,00	9,90	9,90	6,40	6,40	6,40	6,40	4,90	4,90

ANEXO ENSAYO 14.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	F 00:03:40 (cm)	F 00:03:20 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:02:40 (cm)	F 00:02:30 (cm)	F 00:02:20 (cm)
3,127	31,27						
2,932	29,32						
2,862	28,62						
2,762	27,62						
2,627	26,27						
2,522	25,22						
2,487	24,87						
2,462	24,62						
2,437	24,37						
2,397	23,97						
2,217	22,17						
2,077	20,77						
1,977	19,77						
1,937	19,37						
1,882	18,82						
1,857	18,57						
1,752	17,52						
1,587	15,87	15,87					
1,437	14,37	15,77	14,37	14,37	14,37		
1,252	12,52	14,6	13,7	13,6	13,8		
1,207	12,07	14,37	13,5	13,4	13,6		
1,157	11,57	14,17	13,3	13,17	13,4	11,57	11,57
1,062	10,62	13,7	13	12,7	12,9	11,82	11,82
1,037	10,37	13,6	12,77	12,77	12,77	11,77	11,77
0,882	8,82	12,52	12	11,9	12	11,4	11,4

Prog (m)	Z (cm)	Hi(cm)	Hf(cm)	F00:10:00 (cm)	00:09:00 (cm)	F00:08:00 (cm)	F00:07:00 (cm)	F00:06:00 (cm)	F00:04:27 (cm)	F00:04:20 (cm)
0,757	7,57	13,17	14,97	12,47	12,47	12,7	12,47	12,47	13	11,9
0,687	6,87	13,27	14,27	12,1	12,1	12,2	12,2	12	12,47	11,6
0,626	6,26	12,96	14,06	11,8	11,8	12	11,9	11,8	12,06	11,3
0,591	5,91	12,91	13,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11
0,501	5,01	12,51	13,01	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01	10,5
0,478	4,78	12,48	12,78	10,78	10,78	10,8	11	10,78	10,78	10,4
0,404	4,04	11,94	12,24	10,34	10,34	10,34	10,5	10,34	10,34	10,1
0,392	3,92	12,02	12,12	10,22	10,22	10,3	10,5	10,22	10,22	10
0,299	2,99	11,59	11,79	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	9,9	9,5
0,277	2,77	11,37	11,57	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,4
0,177	1,77	11,07	11,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,1
0,164	1,64	10,94	11,04	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,04
0,06	0,6	10,9	11	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,5
0,04	0,4	10,9	10,9	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	6,1
0	0	10,5	10,5	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	5,1	1,5

Prog (m)	Z (cm)	F 00:04:20 (cm)	F 00:03:40 (cm)	F 00:03:20 (cm)	F 00:03:00 (cm)	F 00:02:40 (cm)	F 00:02:30 (cm)	F 00:02:20 (cm)
0,757	7,57	11,9	11,6	11,2	11,2	11,2	10,7	11,07
0,687	6,87	11,6	11,4	10,9	10,9	10,8	10,37	6,87
0,626	6,26	11,3	11	10,56	10,4	10,3	10,06	
0,591	5,91	11	10,9	10,21	10,2	10,1	5,91	
0,501	5,01	10,5	10,25	9,6	9,6	9,51		
0,478	4,78	10,4	10,18	9,5	9,5	4,78		
0,404	4,04	10,1	9,84	8,94	8,94			
0,392	3,92	10	9,72	9,02	3,92			
0,299	2,99	9,5	9,09	8,59				
0,277	2,77	9,4	8,87	2,77				
0,177	1,77	9,1	8,27					
0,164	1,64	9,04	1,64					
0,06	0,6	8,5						
0,04	0,4	6,1						
0	0	1,5						

ANEXO ENSAYO 15.

Tablas de datos medidos sobre el canal experimental

Prog (m)	Z (cm)	Hi (cm)	Hf (cm)	F Ini (cm)	F 00:00:10 (cm)	F 00:00:20 (cm)	F 00:00:30 (cm)	F 00:00:50 (cm)	F 00:01:00 (cm)	F 00:01:30 (cm)
3,22	32,22	33,92	33,92							
2,52	25,22	27,12	26,92	25,22						
2,49	24,87	27,47	26,77	25,40						
2,46	24,62	27,52	26,32	25,62						
2,44	24,37	27,57	26,17	25,50						
2,40	23,97	27,07	25,67	25,37						
2,22	22,17	25,47	23,77	23,57						
2,08	20,77	23,67	22,57	22,07						
2,00	19,95	22,85	21,65	21,35	21,35					
1,39	13,90	17,30	15,60	15,90	15,80	14,00				
1,34	13,40	17,00	15,40	15,70	15,70	15,70	13,40			
1,12	11,15	16,05	12,75	14,45	13,80	14,45	13,45	11,15		
0,96	9,61	14,81	11,21	13,31	12,70	13,31	12,51	11,91	9,61	
0,88	8,76	14,06	10,16	12,56	12,30	12,56	11,76	11,36	11,16	
0,85	8,51	13,91	10,01	12,30	12,10	12,41	11,61	11,31	11,31	
0,83	8,31	13,81	10,01	12,20	12,10	12,31	11,51	11,11	11,11	8,31
0,77	7,72	13,32	9,22	11,62	11,40	11,82	11,02	10,92	10,92	9,82
0,73	7,32	13,02	9,42	11,50	11,20	11,52	10,92	10,82	10,82	10,82
0,69	6,91	13,01	9,71	11,31	11,00	11,31	10,71	10,61	10,61	10,80
0,60	5,96	12,66	10,26	11,06	11,06	11,06	10,46	10,46	10,46	10,46
0,30	2,96	11,16	10,36	9,86	9,86	9,86	9,06	9,06	9,06	9,06
0,09	0,86	11,06	10,66	9,16	9,16	9,16	8,26	8,26	8,26	8,26
0,06	0,60	10,90	10,50	9,00	9,00	9,00	6,50	6,50	6,50	6,50
0,03	0,30	11,00	11,00	8,70	8,70	8,70	4,60	4,60	4,60	4,60
0,00	0,00	10,90	10,90	5,90	4,00	4,00	3,30	3,30	3,30	3,30

Prog (m)	Z (cm)	F 00:02:00 (cm)	F 00:02:30 (cm)	F 00:04:30 (cm)	F 00:09:00 (cm)
3,22	32,22				
2,52	25,22				
2,49	24,87				
2,46	24,62				
2,44	24,37				
2,40	23,97				
2,22	22,17				
2,08	20,77				
2,00	19,95				
1,39	13,90				
1,34	13,40				
1,12	11,15				
0,96	9,61				
0,88	8,76				
0,85	8,51				
0,83	8,31				
0,77	7,72	7,72			
0,73	7,32	8,32	7,32	7,32	7,32
0,69	6,91	9,01	8,21	8,31	7,51
0,60	5,96	10,46	8,66	8,56	7,56
0,30	2,96	9,06	9,06	8,36	7,86
0,09	0,86	8,26	8,26	7,66	7,66
0,06	0,60	6,50	6,50	5,50	5,50
0,03	0,30	4,60	4,60	4,10	4,20
0,00	0,00	3,30	3,30	3,30	3,30