



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación hidráulica del transporte y exclusión de sedimentos en la Estación Elevadora de Canoas – EEARC a través de modelación física

Juan Fernando Cuervo Arévalo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2021

Evaluación hidráulica del transporte y exclusión de sedimentos en la Estación Elevadora de Canoas – EEARC a través de modelación física

Juan Fernando Cuervo Arévalo

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:
I.C. M.Sc. Dr.Eng. Jaime Iván Ordóñez Ordóñez
Codirector:
I.C. M.Sc. Carlos Eduardo Cubillos Peña

Línea de Investigación:
Ingeniería Hidráulica, Modelación de fenómenos y amenazas naturales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2021

Agradecimientos

Este trabajo fue posible realizarlo gracias a la ayuda de muchas personas que de una u otra forma aportaron para alcanzar el objetivo final. Doy gracias a Dios porque me permitió finalizar esta investigación en medio de las dificultades de la emergencia sanitaria por la pandemia del Covid-19, sin que ningún familiar o ser querido padeciera la enfermedad.

Gracias a mis padres que en todo momento e incondicionalmente me mostraron su apoyo.

Agradezco la guía, supervisión y consejos del director del presente trabajo, el ingeniero Jaime Iván Ordóñez del cual aprendí mucho más que teoría y aspectos técnicos.

Gracias al codirector, el profesor Cubillos, que me brindó su ayuda para perfeccionar todo lo relacionado con la estructuración de la investigación y el trabajo.

Agradezco el apoyo de mi novia y mis amigos a lo largo de este proceso de aprendizaje.

Finalmente, agradezco a la Universidad, la cual la considero como mi casa y a la que le debo todo lo que soy y todo lo que he aprendido desde el pregrado.

Resumen

La ciudad de Bogotá actualmente está desarrollando los diseños de la futura Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Canoas la cual tratará alrededor del 70% de las aguas residuales de la ciudad. Para esta, se hace necesario la construcción de la Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas (EEARC) que impulse estas aguas desde una profundidad de 40m (sitio de entrega del Interceptor Tunjuelo – Canoas) a través de bombas centrífugas de gran tamaño y que son susceptibles a deteriorarse por los sedimentos gruesos que puedan ser succionados.

El presente estudio evaluó hidráulicamente, a través de modelación física, una propuesta de geometría y un sistema de excluidores de sedimentos que permitiera optimizar las condiciones hidráulicas de la EEARC y redujera la futura necesidad de mantenimiento de los equipos de bombeo. El desarrollo de la experimentación se llevó a cabo en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (LEH) de la Universidad Nacional de Colombia y se realizó en dos etapas: una en ausencia de sedimentos, donde se estudió el comportamiento del flujo, y otra en presencia de sedimentos, donde se evaluó la respuesta de la Estación frente a diferentes condiciones de carga sedimentológica. Se encontró finalmente, que las propuestas de cambio de geometría proporcionan una repartición adecuada de caudal para el cribado, además de que se generan condiciones estables y apropiadas en los cárcamos de bombeo. Se demostró la buena eficiencia del sistema de excluidores de sedimentos y por tanto la disminución de la necesidad de mantenimiento futuro de los equipos de bombeo de la estación.

Palabras clave: transporte de sedimentos, modelación física, excluidores de sedimentos, alcantarillados, hidráulica de canales.

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Antecedentes y contexto	21
1.1 Sentencia del Río Bogotá	21
1.2 Generalidades de la PTAR Canoas	22
1.3 Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas (EEARC).....	23
2. Marco conceptual.....	28
2.1 Hidrodinámica del flujo en estructuras hidráulicas	28
2.2 Flujo rápidamente variado	31
2.3 Transporte de sedimentos.....	33
2.4 Exclusión de sedimentos.....	39
2.5 Naturaleza de los sedimentos en alcantarillados	41
2.6 Modelación física en hidráulica.....	44
3. Investigación experimental.....	49
3.1 Alcance general	49
3.2 Actividades desarrolladas.....	49
4. Descripción de la instalación UISA.....	51
4.1 Tanque de almacenamiento	53
4.2 Sistema de bombeo	53
4.3 Tanque de entrada.....	55
4.4 Canales de modelación	56
4.5 Robot de medición	57
4.6 Canal de retorno	57
5. Cambios al diseño de la EEARC	59
5.1 Cambios al diseño geométrico	59
5.1.1 Repartición del flujo en la entrada a la Estación.....	59
5.1.2 Geometría de la expansión en la zona de cribado	61
5.1.3 Geometría de canales de conexión y cárcamos de bombeo	65
5.2 Propuesta de sistema de exclusión de sedimentos	68
6. Escalas de modelación.....	70
6.1 Escalas de modelación hidráulica	71
6.2 Escalas de modelación sedimentológica	72
7. Definición del material granular	76
8. Descripción del modelo físico.....	80
8.1 Diseño del modelo y acople a la UISA.....	80
8.1.1 Localización del modelo.....	80
8.1.2 Abastecimiento de caudal líquido	81
8.1.3 Descarga y aforo de caudal líquido.....	82
8.1.4 Control de niveles y condiciones de operación	82
8.1.5 Abastecimiento y exclusión de sedimentos.....	83

8.2	Proceso de construcción del modelo.....	84
8.2.1	Escalado de la EEARC e Impresión de partes	85
8.2.2	Construcción de zona de cribado	85
8.2.3	Construcción de canales de conexión	86
8.2.4	Construcción de zonas de bombeo y de sedimentos	87
8.2.5	Acople final del modelo e impermeabilización general.....	88
8.2.6	Construcción del dosificador de sedimentos.....	90
8.3	Procedimiento de operación del modelo	90
9.	Programa experimental	92
9.1	Modelación hidráulica sin sedimentos.....	92
9.1.1	Condiciones de operación del modelo.....	92
9.1.2	Toma de datos experimentales	93
9.2	Modelación hidráulica con sedimentos.....	102
9.2.1	Condiciones de operación del modelo.....	102
9.2.2	Toma de datos experimentales	102
10.	Modelación sin sedimentos	106
10.1	Caudal Bajo – Inferior al Caudal Medio de la EEARC	106
10.1.1	Generalidades	106
10.1.2	Repartición del flujo en canales de cribado	107
10.1.3	Comportamiento de cárcamos de bombeo	109
10.2	Caudal Medio de operación	111
10.2.1	Generalidades	111
10.2.2	Repartición del flujo en canales de cribado	112
10.2.3	Comportamiento de cárcamos de bombeo	114
10.3	Caudal Medio Alto de operación	115
10.3.1	Generalidades	115
10.3.2	Repartición del flujo en canales de cribado	116
10.3.3	Comportamiento de cárcamos de bombeo	118
10.4	Caudal Máximo de operación.....	120
10.4.1	Generalidades	120
10.4.2	Repartición del flujo en canales de cribado	121
10.4.3	Comportamiento de cárcamos de bombeo	123
11.	Modelación del transporte y exclusión de sedimentos.....	125
11.1	Caudal Bajo de operación.....	125
11.1.1	Respuesta ante Carga Media de sedimentos	125
11.2	Caudal Medio de operación	132
11.2.1	Respuesta ante Carga Media de sedimentos	132
11.2.2	Respuesta ante Carga Alta de sedimentos.....	137
11.3	Caudal Medio Alto de operación	143
11.3.1	Respuesta ante Carga Media de sedimentos	143
11.3.2	Respuesta ante Carga Alta de sedimentos.....	148
11.4	Caudal Máximo de operación.....	153
11.4.1	Respuesta ante Carga Media de sedimentos	153
11.4.2	Respuesta ante Carga Alta de sedimentos.....	158
12.	Conclusiones y recomendaciones	163
13.	Bibliografía	169

Lista de Figuras

Figura 1-1. Esquema general aproximado de la EEARC en planta.....	24
Figura 1-2. Esquema en perfil de las zonas de la EEARC.....	25
Figura 1-3. Esquema en perfil del diseño básico EEARC.....	26
Figura 1-4. Geometría cárcamos de bombeo en diseño básico.....	27
Figura 2-1. Cambios de la hidrodinámica del flujo en presencia de un obstáculo.....	29
Figura 2-2. Separación de capa límite alrededor de un obstáculo (ILCE, 2015).....	29
Figura 2-3. Formación de la capa límite (izq.), y separación del flujo(der.). (Abernathy, 1958).....	30
Figura 2-4. Comportamiento del flujo en caída brusca (Chaudhry, 2007).....	32
Figura 2-5. Diseño de expansiones y contracciones súbitas (Formica en Chow 1959)...	32
Figura 2-6. Pérdidas de energía en transiciones súbitas (Formica en Chow 1959).....	33
Figura 2-7. Coeficiente de arrastre como función de Re y de la geometría de la partícula (Simons & Senturk, 1992).....	35
Figura 2-8. Ángulo de reposo material granular.....	35
Figura 2-9. Esfuerzo cortante y factor de fricción en función de la velocidad media del flujo (Raudkivi en García 2008).....	36
Figura 2-10. Exclusión de sedimentos vs exclusión de agua en exclusores laterales. (Ordoñez y otros, 2008).....	40
Figura 2-11. Exclusor de sedimentos a 45° (Ordoñez y otros, 2008).....	40
Figura 2-12. Exclusión de sedimentos vs exclusión de agua en exclusores a 45° (Ordoñez y otros, 2008).....	41
Figura 2-13. Tamaños de partículas típicas en alcantarillados (Ghani,1993).....	42
Figura 2-14. Granulometrías en alcantarillados de Escocia (Arthur y otros, 1996).....	43
Figura 2-15. Granulometrías encontradas en Alor Setar (Ghani y otros, 2000).....	43
Figura 4-1. Unidad de Investigación de la Socavación y Agradación UISA – LEH (Flórez Otero, 2008).....	52
Figura 4-2. Sistema de bombeo UISA (Flórez Otero, 2008).....	54
Figura 4-3. Fotografías del sistema de bombeo UISA.....	54
Figura 4-4. Entrega de agua al tanque de entrada UISA.....	55
Figura 4-5. Canales de modelación UISA. Exclusor (izq.), compuertas basculantes (der.).....	56
Figura 4-6. Canal de retorno (izq.) y canaleta Parshall (der.) UISA.....	57
Figura 4-7. Curva de calibración de la canaleta Parshall (Flórez Otero, 2008).....	58
Figura 5-1. Variación de velocidad de flujo en una tubería circular (izq.) y propuesta de división de flujo de entrada (der.).....	60

Figura 5-2. Diferentes formas consideradas para distribuir el flujo en el pozo de cribado.	60
Figura 5-3. Planta de la geometría del pozo de cribado usada en el modelo.	61
Figura 5-4. Perfil de la geometría del pozo de cribado utilizada en el modelo	62
Figura 5-5. Ángulos de expansión y contracción del pozo de cribado en el modelo	62
Figura 5-6. Duncrue Street Inlet Works, Belfast PTAR. (Huber Technology, 2015)	64
Figura 5-7. Vista en planta de la estructura, Duncrue St. Inlet, medidas con Google Earth	64
Figura 5-8. Vista frontal estructura y muros deflectores. (Huber Technology, 2015).....	65
Figura 5-9. Planta de la propuesta de geometría de la EEARC en el pozo de bombeo... 66	
Figura 5-10. Perfil de la propuesta de geometría de la EEARC en el pozo de bombeo... 66	
Figura 5-11. Cambio de sección de los cárcamos de bombeo en el modelo.	68
Figura 5-12. Detalle geometría entrada excluidores tipo frontal (izq.) y a 45° (der.).	69
Figura 5-13. Propuesta de sistema de exclusión de sedimentos EEARC (Planta y Perfil).	69
Figura 7-1. Distribución granulométrica esperada en el prototipo y modelo.	76
Figura 7-2. Materiales utilizados para representar los sedimentos del modelo.....	78
Figura 7-3. Granulometría de los 4 materiales disponibles.....	78
Figura 7-4. Pruebas de combinación de granulometrías con arena fina (M#1) como material predominante.	79
Figura 8-1. Esquema general modelo físico EEARC	81
Figura 8-2. Dosificador de sedimentos modelo EEARC.	83
Figura 8-3. Distribución de piezas sobre lámina para corte.	85
Figura 8-4. Construcción parcial zona de cribado (izq.), zona de cribado finalizada (der.).	86
Figura 8-5. Construcción parcial canales de conexión (izq.), canales finalizados (der.). . 86	
Figura 8-6. Cárcamos de bombeo y foso de sedimentos; original en Dry Wall (izq.), y final en mampostería (der.).....	87
Figura 8-7. Modelo finalizado antes (izq.) y después (der.) de la impermeabilización	88
Figura 8-8. Impermeabilización elástica (izq.) y fibrosa (der.).....	89
Figura 8-9. Construcción del modelo EEARC finalizada.....	89
Figura 8-10. Construcción de dosificador de sedimentos.	90
Figura 9-1. Tubo Pitot construido	94
Figura 9-2. Esquema del tubo Pitot construido.....	95
Figura 9-3. Localización de mediciones con tubo Pitot.....	96
Figura 9-4. Comportamiento ascendente o descendente de la cuña de agua inclinada. . 97	
Figura 9-5. Micromolinetes utilizados en la experimentación.	98
Figura 9-6. Hélice de alta sensibilidad (izq.) y de sensibilidad media (der.).....	98
Figura 9-7. Localización de mediciones con micromolinete.....	99
Figura 9-8. Ecuaciones de calibración y validez de uso de cada hélice	99
Figura 9-9. Correlación Q canaleta Parshall vs Q molinete (Flujo Uniforme).....	100
Figura 9-10. Correlación Q canaleta Parshall vs Q molinete H-4 (Flujo RV).....	100
Figura 9-11. Correlación Q canaleta Parshall vs Q molinete H-1 (Flujo RV).....	101
Figura 9-12. Descarga de caudal derivado por los excluidores.	103

Figura 10-1. Ondulaciones superficiales y turbulencia general EEARC. Caudal Bajo.... 107

Figura 10-2. Entrega ITC a EEARC canales derecho, izquierdo y central. Caudal Bajo 107

Figura 10-3. Ondulaciones y turbulencia en canales central y laterales. Caudal Bajo ... 108

Figura 10-4. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Bajo 110

Figura 10-5. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Bajo 110

Figura 10-6. Ondulaciones superficiales y vista general de la EEARC. Caudal Medio .. 111

Figura 10-7. Entrega ITC a EEARC canales derecho, izquierdo y central. Caudal Medio
..... 112

Figura 10-8. Ondulaciones y turbulencia en canales central y laterales. Caudal Medio. 112

Figura 10-9. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Medio 114

Figura 10-10. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Medio 115

Figura 10-11. Ondulación superficial y vista general EEARC. Caudal Medio Alto..... 116

Figura 10-12. Entrega ITC a EEARC canales de cribado. Caudal Medio Alto 116

Figura 10-13. Ondulaciones y turbulencia en canales de cribado. Caudal Medio Alto ... 117

Figura 10-14. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Medio Alto. 119

Figura 10-15. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Medio Alto 119

Figura 10-16. Ondulación superficial y vista general EEARC. Caudal Máximo..... 120

Figura 10-17. Entrega ITC canales derecho, izquierdo y central. Caudal Máximo..... 121

Figura 10-18. Ondulaciones y turbulencia en canales central y laterales. Caudal Máximo
..... 121

Figura 10-19. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Máximo..... 123

Figura 10-20. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Máximo 123

Figura 11-1. Depositación en el fondo del ITC. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio ... 126

Figura 11-2. Depósitos en los canales de cribado. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio
..... 127

Figura 11-3. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.).
Caudal Bajo y Abastecimiento Medio 127

Figura 11-4. Sedimentos excluidos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio 128

Figura 11-5. Esquema de depositación en planta. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio
..... 128

Figura 11-6. Granulometrías de los depósitos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio ... 131

Figura 11-7. Leve depósito en el ITC (izq.) y en zona centro de entrada (der.). Caudal
Medio y Abastecimiento Medio 132

Figura 11-8. Depósitos en los canales de cribado. Caudal Medio y Abastecimiento Medio
..... 133

Figura 11-9. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.).
Caudal Medio y Abastecimiento Medio..... 133

Figura 11-10. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.).
Caudal Medio y Abastecimiento Medio..... 134

Figura 11-11. Esquema de depositación en planta. Caudal Medio y Abastecimiento Medio
..... 134

Figura 11-12. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Medio.
..... 137

Figura 11-13. Depositación en el fondo del ITC. Caudal Medio y Abastecimiento Alto .. 138

Figura 11-14. Depósito en los canales de cribado. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.	139
Figura 11-15. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Alto.....	138
Figura 11-16. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Alto.....	140
Figura 11-17. Esquema de depositación en planta. Caudal Medio y Abastecimiento Alto	140
Figura 11-18. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Alto. .	143
Figura 11-19. Depósitos en los canales de cribado (izq.) y en entrada a la EEARC (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio	144
Figura 11-20. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y en cercanías a excluidores (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio	144
Figura 11-21. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio	145
Figura 11-22. Esquema de depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio	145
Figura 11-23. Curvas granulométricas de los depósitos de sedimentos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio.....	148
Figura 11-24. Canales de cribado. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto	149
Figura 11-25. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto.....	149
Figura 11-26. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto.....	150
Figura 11-27. Esquema de depositación. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto	150
Figura 11-28. Granulometrías de depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto.	153
Figura 11-29. Depósito en los canales de cribado (izq.) y en entrada a la EEARC (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.....	154
Figura 11-30. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.....	154
Figura 11-31. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.....	155
Figura 11-32. Esquema de depositación en planta. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.....	155
Figura 11-33. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio	158
Figura 11-34. Depósitos en los canales de cribado. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto	159
Figura 11-35. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Alto	159
Figura 11-36. Sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Alto.....	159
Figura 11-37. Esquema de depositación. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto.....	160
Figura 11-38. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto	162
Figura 12-1. Rendimiento del sistema de exclusión de sedimentos EEARC	166

Lista de Tablas

Tabla 7-1. Estimación de granulometría para sedimentos del modelo.....	77
Tabla 9-1. Condiciones de operación estudiada en prototipo y modelo	92
Tabla 9-2. Niveles en canaleta Parshall para caudales del modelo	93
Tabla 9-3. Condiciones de operación buscadas para modelación sedimentológica.....	102
Tabla 10-1. Condiciones de operación del modelo. Caudal Bajo.....	108
Tabla 10-2. Resultados obtenidos de caudal y velocidad. Hélice H-1. Caudal Bajo.....	109
Tabla 10-3. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-1. Caudal Bajo.....	109
Tabla 10-4. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Bajo.....	111
Tabla 10-5. Condiciones de operación del Modelo. Caudal Medio.	113
Tabla 10-6. Resultados obtenidos de caudal y velocidad. Hélice H-4. Caudal Medio	113
Tabla 10-7. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-4. Caudal Medio	114
Tabla 10-8. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Medio	115
Tabla 10-9. Condiciones de operación del Modelo Caudal Medio Alto.	117
Tabla 10-10. Resultados caudal y velocidad. Hélice H-4. Caudal Medio Alto.	118
Tabla 10-11. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-4. Caudal Medio Alto.	118
Tabla 10-12. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Medio Alto	120
Tabla 10-13. Condiciones de operación del modelo Caudal Máximo.....	122
Tabla 10-14. Resultados obtenidos de caudal y velocidad. Hélice H-4. Caudal Máximo	122
Tabla 10-15. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-4. Caudal Máximo.....	122
Tabla 10-16. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Máximo.....	124
Tabla 11-1. Condiciones de operación del modelo. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio	126
Tabla 11-2. Transporte y exclusión de sedimentos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio	129
Tabla 11-3. Medición de niveles y espesores. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio	130
Tabla 11-4. Granulometrías de los depósitos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio.....	131
Tabla 11-5. Condiciones de operación del modelo. Caudal Medio y Abastecimiento Medio	132
Tabla 11-6. Transporte y exclusión de sedimentos. Caudal Medio y Abastecimiento Medio	135
Tabla 11-7. Medición de niveles y espesores. Caudal Medio y Abastecimiento Medio. .	136
Tabla 11-8. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Medio ..	136
Tabla 11-9. Condiciones de operación de la Estación. Caudal Medio y Abastecimiento Alto	138
Tabla 11-10. Transporte y exclusión de sedimentos. Caudal Medio y Abastecimiento Alto	141

Tabla 11-11. Mediciones de niveles y espesores. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.	141
Tabla 11-12. Granulometrías de depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.....	142
Tabla 11-13. Operación del modelo. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio.....	143
Tabla 11-14. Exclusión de sedimentos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio	146
Tabla 11-15. Niveles y espesores. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio.....	147
Tabla 11-16. Granulometrías de depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio	147
Tabla 11-17. Condiciones de operación y abastecimiento de la Estación. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto.....	149
Tabla 11-18. Exclusión de sedimentos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto.....	151
Tabla 11-19. Medición de niveles y espesores. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto	152
Tabla 11-20. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto	152
Tabla 11-21. Condición de operación del modelo. Caudal Máximo y abastecimiento Medio.....	153
Tabla 11-22. Exclusión de sedimentos. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.....	156
Tabla 11-23. Niveles y espesores. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.....	157
Tabla 11-24. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.	157
Tabla 11-25. Operación y abastecimiento del modelo. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto.....	158
Tabla 11-26. Exclusión de sedimentos. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto.....	161
Tabla 11-27. Medición de niveles y espesores. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto	161
Tabla 11-28. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto.	162
Tabla 12-1. Resumen de resultados obtenidos y escalados al prototipo.....	164

Introducción

Las conducciones de los alcantarillados se diseñan para que se presente un autolavado de los materiales transportados con las aguas (residuales y/o pluviales) con base en las leyes hidráulicas de esfuerzos de corte y arrastre. Se espera que los sedimentos que pudiesen encontrarse en el sistema estén bajo constante transporte y no se depositen dentro de la red (salvo en momentos de bajo caudal). Según Ghani (1993), en su trabajo relacionado con la presencia de sedimentos en alcantarillados, el transporte de material particulado puede darse en estados de no depositación y de alguna depositación. De esta forma, es de esperarse que a la salida de este tipo de sistemas se encuentren sedimentos que deberán ser removidos y tratados adecuadamente.

Para el tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Bogotá, y en búsqueda de disminuir sustancialmente los niveles de contaminación del Río Bogotá, se están adelantado los diseños de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que recibirá las aguas servidas de las cuencas Fucha, Tunjuelo, Tintal y del municipio de Soacha, denominada PTAR Canoas. Sin embargo, las aguas residuales a tratar, correspondientes aproximadamente a $2/3$ del total de la ciudad, llegarán al sitio de la planta a una profundidad de alrededor de 40m, y requerirán por tanto ser bombeadas para ingresar a la planta. Este bombeo se realizará mediante la Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas (EEARC), la cual debido a su profundidad de instalación, se espera que presente problemas de sedimentación difíciles de resolver.

El presente escrito tiene por objeto presentar el informe de Trabajo Final de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, y así, optar al título de Magister dentro del programa de posgrado de la Universidad Nacional de Colombia. Para esto, se ha optado por una investigación experimental, que permita evaluar hidráulicamente a través de la modelación física, el comportamiento hidráulico y la posible exclusión y manejo de los sedimentos aportados por las aguas residuales, en la Estación Elevadora de Canoas, cuyo adecuado funcionamiento es esencial para la PTAR en construcción.

Identificación del problema y justificación

A través del tiempo, muchos investigadores han estudiado el fenómeno de transporte y arrastre de sedimentos en diferentes campos de investigación como por ejemplo los ríos, canales artificiales para el transporte de agua, y hasta en tuberías a presión. Este problema está ampliamente revisado para casos comunes de ingeniería donde el comportamiento del flujo es relativamente predecible y por ende susceptible a ser definido por las leyes hidráulicas físicas conocidas para el transporte de sedimentos. Sin embargo, cuando el ingeniero se enfrenta a un problema relacionado, pero en el que actúan varios factores adicionales que suman complejidad al fenómeno, es necesario hacer uso de herramientas especiales que permitan un mejor entendimiento de la situación.

Con respecto al flujo de agua sobre y alrededor de estructuras hidráulicas complejas, muchos investigadores han estudiado el flujo rápidamente variado, el fenómeno de desprendimiento de capa límite (separación de flujo), y la generación de vórtices, turbulencia y corrientes secundarias, pero aún no se ha podido alcanzar un entendimiento completo del mismo, principalmente debido a su alta complejidad y a la combinación de factores de difícil control que ocurren simultáneamente. Este tipo de comportamientos es uno de los casos de estudio de mayor importancia de la época actual y que tiene repercusiones muy grandes, por ejemplo, en el diseño de estructuras hidráulicas de gran importancia para una población, como la Estación Elevadora de Aguas Residuales (EEARC) objeto de estudio.

El adecuado estudio y control de los sedimentos es un problema de gran relevancia en el diseño de estaciones elevadoras y de impulsión, cuando el flujo a bombear contiene cantidades importantes de sedimentos que podrían afectar la integridad de los impulsores. Este es el caso de la EEARC como estructura necesaria para entregar las aguas residuales captadas de gran parte de la ciudad de Bogotá a la PTAR CANOAS, a través de 6 bombas

de gran tamaño y que podrían ser susceptibles a erosión continua a causa de los sedimentos presentes en las aguas residuales y que superaron la etapa de cribado de la Estación.

Este trabajo de grado se originó al tiempo que el diseño detallado de la EEARC, en el cual el director de la presente investigación participó en calidad de especialista hidráulico de la interventoría. El diseño detallado de la estructura provenía de un estudio anterior de diseño básico, dentro del cual se consideró que, por estar la Estación situada a gran profundidad, la única manera de eliminar los sedimentos que ingresaran a la misma, era por medio de la propia succión de las bombas y posterior remoción en la PTAR. Por este motivo, surgió la idea de plantear una solución diferente y evitar el posible desgaste de los rotores de las bombas, el cual podría generar gastos considerables y otros problemas de mantenimiento en la Estación.

Simultáneamente, se discutían a finales del año 2019 las posibles formas de mejorar la distribución del agua en las cámaras de cribado y los cárcamos de bombeo, problemas que debían ser estudiados mediante modelación hidráulica en el exterior. Estos estaban mayormente dirigidos al estudio del mejoramiento de las condiciones del bombeo, por lo que se sugirió realizar otra investigación dentro del programa de posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional y buscar formas alternativas de manejo de sedimentos y optimización hidráulica, en concordancia con investigaciones anteriores en dicho programa, sobre el particular.

Según Ordóñez (2012), la experimentación sobre modelos físicos en hidráulica, es una herramienta poderosa para el diseño adecuado de estructuras hidráulicas, como lo ha reconocido recientemente el Banco mundial en su publicación técnica. Dicha herramienta, que es de uso común en muchos países reconocidos en el área, como los Estados Unidos, México, Brasil, Argentina y Chile, ha entrado en serio desuso en Colombia, por la falsa premisa de que la metodología implica instalaciones costosas y tiempos demasiado largos en la solución de los problemas. Afirmación que no tiene asidero práctico si se considera el número de fallas recientes en grandes proyectos de infraestructura, que generan demoras mucho mayores que las necesarias para un diseño adecuado de las obras.

Por las razones planteadas, resulta pertinente la investigación de estos problemas sobre modelos físicos, bajo condiciones experimentales comparables a las que ocurren en el prototipo. Así, se puede estimar la efectividad y viabilidad de las medidas de exclusión y control de sedimentos, y definir las ventajas que podría otorgar un sistema de excluidores a la Estación Elevadora de Canoas. La investigación que se ha realizado, busca también analizar la conveniencia del cambio de la geometría de los canales de la Estación para así controlar mejor variables hidráulicas relevantes como velocidad, profundidad, vorticidad, entre otras.

El presente trabajo, además pretende demostrar el uso de modelos físicos en hidráulica para analizar experimentalmente la posibilidad de implementación de algunos mecanismos y sistemas de exclusión de sedimentos, a la vez que se estudia el comportamiento de las dinámicas de flujo que podrían presentarse una vez entre la Estación en operación. Se analiza el cómo realizar un montaje experimental adecuado para este objetivo, y se estudia la influencia que podría tener el cambio de geometría sobre el diseño original de la Estación.

Objetivos

General

Proponer y evaluar hidráulicamente a través de modelación física, una alternativa de geometría y un sistema de esclusores de sedimentos para la Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas – EEARC

Específicos

- Construir un modelo físico hidráulico de la primera parte de la EEARC, desde la entrada de la Estación hasta los cárcamos de bombeo.
- Proponer un sistema de esclusores de sedimentos para la EEARC y evaluar su eficiencia.
- Proponer una alternativa en la geometría de los canales y pendientes de fondo que permita optimizar las condiciones hidráulicas de la Estación.
- Evaluar el estado e integridad de la Unidad de Investigación de la Socavación y Agradación (UISA) del LEH que será utilizada para la realización del estudio.

1. Antecedentes y contexto

En este capítulo se describe de forma general los aspectos más relevantes involucrados en la conceptualización y diseño de la Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas (EEARC). Se presenta una descripción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Canoas, una descripción de la EEARC y una revisión de la necesidad e importancia de su construcción.

1.1 Sentencia del Río Bogotá

El día 28 de marzo de 2014 el Consejo de Estado ratificó una sentencia para la descontaminación del Río Bogotá, ordenando el diseño e implementación de las medidas necesarias para lograr ese objetivo. De esta forma se busca preservar y proteger la cuenca hidrográfica del río y de recuperar la calidad del agua y biodiversidad en el futuro.

La decisión fue tomada frente a la catástrofe ambiental, ecológica, económica y social de la cuenca del río Bogotá a causa de los altísimos niveles de contaminación debido a descargas continuas de aguas residuales industriales y domésticas, y de aquellas provenientes de malas prácticas agropecuarias y de manejos de las basuras por más de treinta años.

La sentencia acogió órdenes de carácter regional, nacional y local, las cuales varían desde un carácter inmediato hasta por un plazo de 3 años como máximo. Como finalidad, se busca la conservación y recuperación de los hidrosistemas relacionados con el río a partir de: el mejoramiento social y ambiental de la cuenca del río Bogotá; articulación y coordinación institucional, intersectorial y económica; y la profundización de procesos educativos y participación ciudadana (IDEAM, 2017).

1.2 Generalidades de la PTAR Canoas

La PTAR Canoas estará localizada en la margen derecha del río Bogotá, en una zona destinada por el POT del municipio de Soacha para este fin (hacienda Canoas). Tal ubicación se ha basado en la necesidad de emplear los caudales de aguas residuales generados por la ciudad de Bogotá para la generación de energía, teniendo en cuenta la concesión existente de las aguas otorgada por la CAR a EMGESA con dicho fin. La PTAR Canoas se concibió por etapas, teniendo en cuenta los altos costos de inversión y operación, y la ausencia de recursos suficientes para la implementación de la solución definitiva. Esto viabilizaría económicamente su construcción y, adicionalmente, permitiría conocer el comportamiento y recuperación real del río ante la calidad del vertimiento generado (EAAB, 2017).

La compleja estructura de la PTAR CANOAS comienza a una profundidad de 40m, donde aproximadamente $2/3$ de las aguas residuales totales de la ciudad de Bogotá son conducidas a través del ITC (Interceptor Tunjuelo – Canoas) hasta la Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas (EEARC), para luego ser impulsadas con la ayuda de 6 equipos de bombeo a una altura de 52 m y un caudal máximo de $36.2 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia la PTAR.

Por primera vez para Colombia se va a implementar el uso de bombas centrífugas de gran tamaño y costo para impulsión de aguas residuales, lo que requiere de un estudio y manejo adecuado de los sedimentos que podrían estar presentes en las aguas y que eventualmente pudiesen afectar negativamente el funcionamiento e integridad de los equipos. Para esto, se tiene planeado el uso de sistemas de cribado para retención de material de gran tamaño, pero no se tiene claro y definido el manejo y exclusión de sedimentos, que presentando posiblemente tamaños desde limos y arcillas, pasando por todos los tamaños de arena, hasta tamaños de gravas, podrían erosionar gravemente los impulsores de las bombas.

A la entrada de la PTAR, al flujo de aguas ya se le debe haber removido el material de mayor tamaño, pero según los diseños elaborados hasta el momento, material particulado de hasta 6cm de diámetro (espaciamiento de las rejillas de cribado) podría haber sido bombeado junto a las aguas residuales. Los residuos removidos por las rejillas, así como el

material más grueso, son conducidos por una banda transportadora hasta ser depositados finalmente en un contenedor de grandes dimensiones.

Ya en la PTAR, el agua residual es llevada hacia la sección de desarenadores y fluye por 6 canales donde se realiza la decantación de las arenas junto a un sistema de aireación a partir de difusores y tornillos sinfín que arrastran estos sedimentos hacia la cámara colectora. Seguidamente, el agua continúa hacia la unidad de mezcla rápida donde entra por 4 cámaras para realizar la inyección de químicos (principalmente cloruro férrico y polímeros) especialmente seleccionados para el tratamiento. La mezcla de estos químicos y agua ingresan a un sistema de sedimentadores primarios circulares con pendientes de fondo hacia el centro, en donde los sólidos en suspensión se precipitan y son conducidos por barredoras a la parte central.

Luego, el agua fluye a través de reactores biológicos donde se realiza una inyección de oxígeno buscando así mantener las actividades biológicas en niveles adecuados y pasar luego a un sistema de sedimentadores secundarios para una segunda etapa de clarificación. Finalmente, la desinfección del agua tratada se hace por medio de hipoclorito líquido que se dosifica en diversos puntos del tanque de desinfección. La entrega de las aguas tratadas al río Bogotá se prevé sumergida y se da a través de una estructura de descarga compuesta por tres canales de sección rectangular. (EAAB, 2019)

El proyecto tiene una inversión total de 4.5 billones de pesos, de los cuales el distrito aportará 2.94 billones (1.48 billones para la obra y 1.46 billones para la operación), la CAR 1.5 billones y la gobernación de Cundinamarca 47 mil millones. Según el cronograma de la entidad, en el año 2023 estaría terminada la fase uno y en 2026 la fase dos, año en el que se espera que esté funcionando en su totalidad.

1.3 Estación Elevadora de Aguas Residuales de Canoas (EEARC)

Como se mencionó, la Estación está concebida para recibir aproximadamente 2/3 de las aguas residuales totales de la ciudad de Bogotá conducidas a través del ITC (interceptor Tunjuelo Canoas). El caudal varía aproximadamente entre 5 m³/s y 38 m³/s en el periodo de vida útil de la Estación (50 años), con un promedio aproximado de 16 m³/s, y su

impulsión requiere de por lo menos seis bombas de succión de gran tamaño. Las bombas se diseñarán específicamente para el transporte de aguas residuales bajo una capacidad máxima de $6.4 \text{ m}^3/\text{s}$, y admitirán materiales suaves, hasta de 305 mm, pero donde es deseable evitar el ingreso de materiales duros, como arenas gruesas, gravas y otros materiales, así como materiales fibrosos que puedan generar la necesidad de un excesivo mantenimiento de estos equipos.

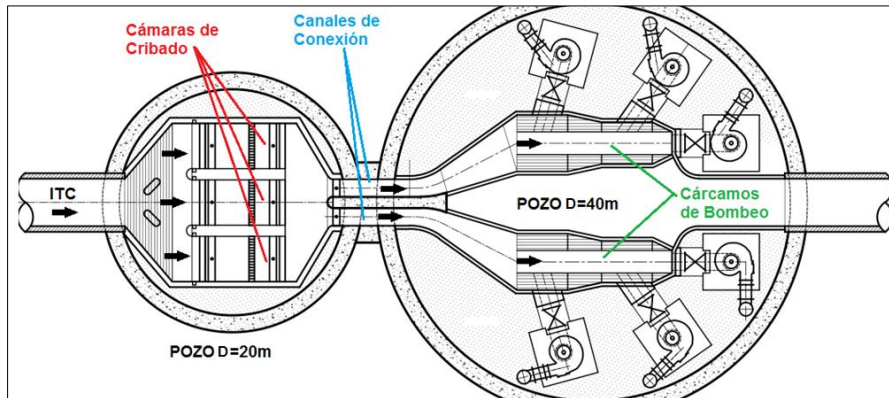


Figura 1-1. Esquema general aproximado de la EEARC en planta.

Para evitar la entrada de materiales indeseables a los cárcamos de bombeo y generar flujos de baja velocidad que permitan una eficiencia adecuada del proceso de bombeo, se tiene prevista una serie de estructuras hidráulicas que son objeto del diseño detallado. La Estación está compuesta de tres cámaras de cribado, dos canales de conexión y dos cárcamos de succión cada uno para tres bombas, situadas a 40 m de profundidad, dentro de dos pozos de 20 m y 40 m de diámetro, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1-1.

El Interceptor Tunjuelo-Canoas (ITC) es un túnel circular de 4.20 m de diámetro que conduce, como se mencionó anteriormente, las aguas residuales de todo el sur de Bogotá. Está conformado por dovelas de concreto y tiene una pendiente de 0.00105, (1.05 por mil), que con el coeficiente de rugosidad bajo del concreto, produce velocidades de hasta 3.5 m/s para el caudal máximo, a la entrada de la Estación de bombeo. Debido a esta pendiente, la diferencia de elevación entre la entrada y salida de la EEARC, en un recorrido de unos 70 m, es muy baja y del orden de 7 cm, lo que dificulta en gran medida la

construcción de un desarenador previo al cribado y por ende un control efectivo de los sedimentos.

El cribado se realiza dentro de un pozo de 20 m de diámetro y 40 m de profundidad donde se instalarán las tres cámaras de cribado con sus rejas correspondientes para retirar el material grueso y flotante, los cárcamos de bombeo se disponen en un pozo de 40 m de diámetro los cuales se conectan a la zona de cribado mediante dos canales de conexión de 3 m de ancho y 10 m de largo.

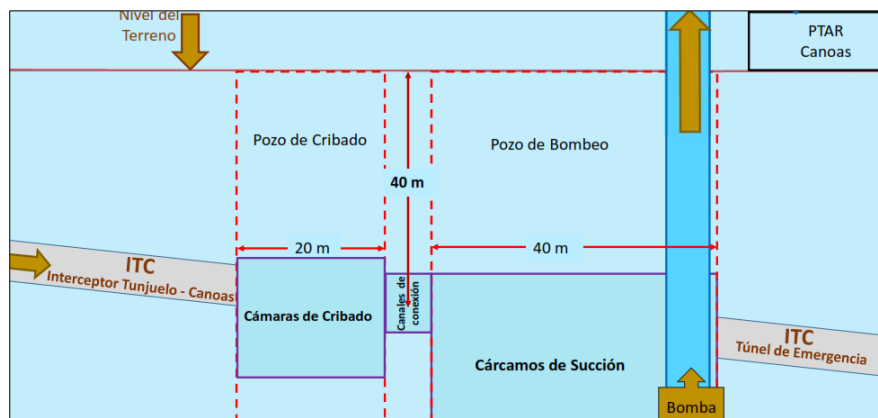


Figura 1-2. Esquema en perfil de las zonas de la EEARC.

En la Figura 1-1 y Figura 1-2 se puede apreciar la dificultad de realizar un diseño hidráulico adecuado del campo de flujo, dado que, en un tramo muy corto, es necesario que el caudal sea dividido en tres partes iguales, garantizando un comportamiento similar entre ellas y que dos cualesquiera permitan el paso del flujo mientras la tercera se encuentre en mantenimiento. Debido a la alta velocidad esperada en el ITC, la realización de dicha separación resulta difícil de predecir y controlar, por lo que se han realizado varias propuestas para obtenerla.

El ancho total de las tres cámaras de cribado es más de tres veces el valor del diámetro del ITC, y en sólo 5 a 10 m resulta imposible reducir suficientemente la velocidad, dado que las rejas de cribado requieren velocidades medias entre 0.5 m/s y 1.3 m/s. El agua debe ser desacelerada para poder disponer de un flujo de baja velocidad en los cárcamos de bombeo; pero a su vez, debe mantenerse lo suficientemente alta dentro de la Estación,

para que los sedimentos en suspensión en las aguas residuales no se depositen en los canales generando problemas de limpieza.

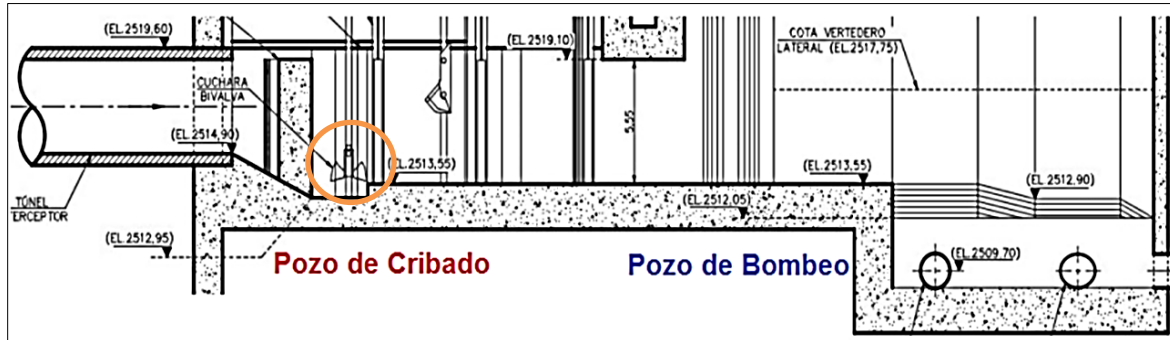


Figura 1-3. Esquema en perfil del diseño básico EEARC.

Las cámaras de cribado, según el diseño básico, tienen piso 1.40m aproximadamente por debajo de la batea del ITC, en tanto que el sector de la transición tiene un piso inferior en casi 2.0 m con una entrada recta desde el ITC, es decir con un foso intermedio para generar depósitos de material muy grueso y pesado que serían removidos mediante una cuchara bivalva operada desde la parte superior del pozo (Figura 1-3). La mayor limitación de este sector del pozo de cribado, consiste en la alta velocidad que se genera y la turbulencia del agua que puede perjudicar el funcionamiento de la cuchara bivalva destinada a la extracción de sedimentos, además de que es la única zona de la Estación que no puede vaciarse de agua en ningún momento, generando incertidumbre sobre las posibilidades de limpieza y mantenimiento.

Las cámaras de cribado comprenden tres canales de 4.0 m de ancho cada uno, con muros laterales rectos para colocar las rejillas al final, y compuertas al inicio para cerrar cada canal individualmente y poder limpiar las cámaras manualmente cuando se requiera. La reja de cribado debe evitar que materiales gruesos puedan sobrepasarla, garantizar una velocidad promedio límite para no depositación en los canales (entre 0.5 y 1.0 m/s), y una velocidad máxima en las rejillas que no puede exceder del doble de la velocidad media (del orden de 1.5 a 2.0 m/s), a fin de evitar que los materiales retenidos se alojen dentro de la reja y se hagan de difícil extracción.

Inicialmente se consideraron dos canales de conexión, con un ancho de 1.50 m cada uno y un muro separador. El ancho del canal se mantuvo pequeño para no generar problemas en el diseño estructural de los pozos, pero hidráulicamente se prefirió un ancho mayor para evitar aumentar de nuevo la velocidad a la entrada a los cárcamos de bombeo y darse el fenómeno de pre-rotación que podría incorporar aire al interior de las bombas afectando su operación. Los canales tienen el propósito de comunicar el pozo de cribado con el pozo de bombeo, y además separar los cárcamos de las bombas de modo que haya hasta tres bombas por cada cárcamo.

Finalmente, el pozo de bombeo recibe las aguas procedentes de los canales de conexión y conforma los dos cárcamos de bombeo donde se alojan los componentes encargados de la admisión de flujo hacia las unidades de bombeo, dejando en el centro un amplio foso cuyas paredes actúan como vertederos para desviar las aguas que no puedan ser bombeadas en caso de emergencia (Figura 1-4), y que en cuyo caso continuarán hacia el sector no utilizado del ITC (túnel de emergencia). Este túnel conecta con el río Bogotá aguas abajo de las compuertas de Alicachín y será utilizado en primera medida si se culmina la construcción de la EEARC antes de la PTAR. Cada una de las tuberías de descarga de los equipos de bombeo vierten las aguas 52 m por encima de los cárcamos hasta una cámara de recibo, previo su ingreso a la PTAR o al río Bogotá.

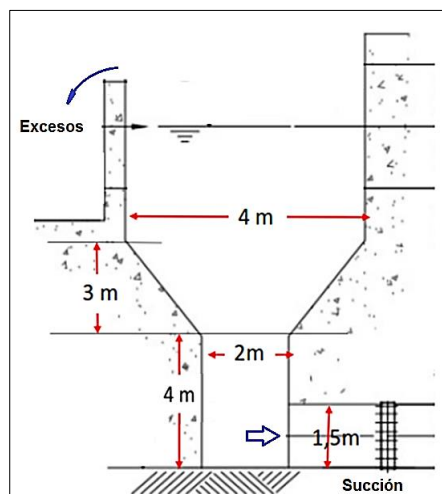


Figura 1-4. Geometría cárcamos de bombeo en diseño básico.

2. Marco conceptual

2.1 Hidrodinámica del flujo en estructuras hidráulicas

Teóricamente, la hidrodinámica del flujo alrededor de estructuras hidráulicas se describe mediante las ecuaciones de Navier-Stokes y el Teorema de transporte de Reynolds. Estas ecuaciones se basan en las leyes de conservación de energía, momentum y masa, y se expresan como ecuaciones diferenciales o integrales de solución compleja en la mayoría de casos.

Según la ley de conservación de energía, una partícula de fluido en un flujo tendrá una cierta cantidad de energía que estará determinada tanto por la presión existente, como por la velocidad y su posición, y se transformará debido a los obstáculos que se presenten o debido a cambios en la geometría de los canales o tuberías por donde fluya. Habrá, entonces, un intercambio de energía cinética y de presión al generarse un cambio en las condiciones hidráulicas del flujo, las cuales pueden eventualmente generar alteraciones de comportamiento local y provocar corrientes secundarias.

La Figura 2-1 representa como ejemplo, los cambios en la hidrodinámica del flujo de agua al encontrarse con un obstáculo como una pila circular en un río o canal abierto. De la figura cabe resaltar que, para un flujo en presencia de una superficie rugosa, este presentará un perfil de velocidades como el que se muestra en la imagen, donde una partícula de fluido tendrá una velocidad baja en cercanías a la superficie del fondo (punto 3) y una velocidad alta más alejada de ella (punto 1). Para el caso de un canal abierto, la superficie rugosa será el fondo, donde la velocidad del flujo es cero en contacto con éste, y máxima en cercanías de la superficie del agua.

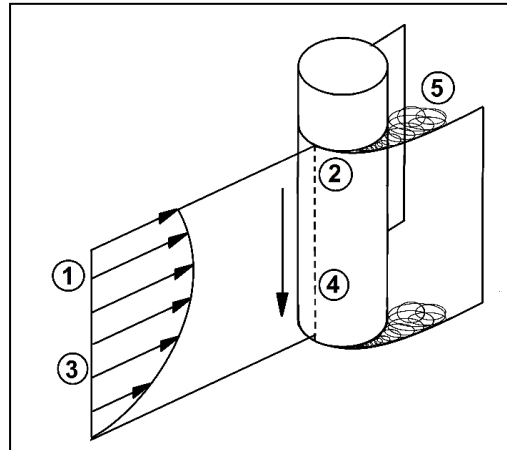


Figura 2-1. Cambios de la hidrodinámica del flujo en presencia de un obstáculo.

Así, una partícula en la posición 1 tendrá una mayor energía cinética que otra ubicada en una posición 3, y por tanto al chocar contra un obstáculo en el punto 2, se generará una presión de estancamiento mayor que en el punto 4 y que será función de la energía cinética que traía la partícula antes del choque, al igual que de la presión hidrostática del punto. Por esto, se generará una corriente secundaria que fluirá desde el punto 2 hacia el punto 4 y contra el fondo del canal causando la formación de vórtices.

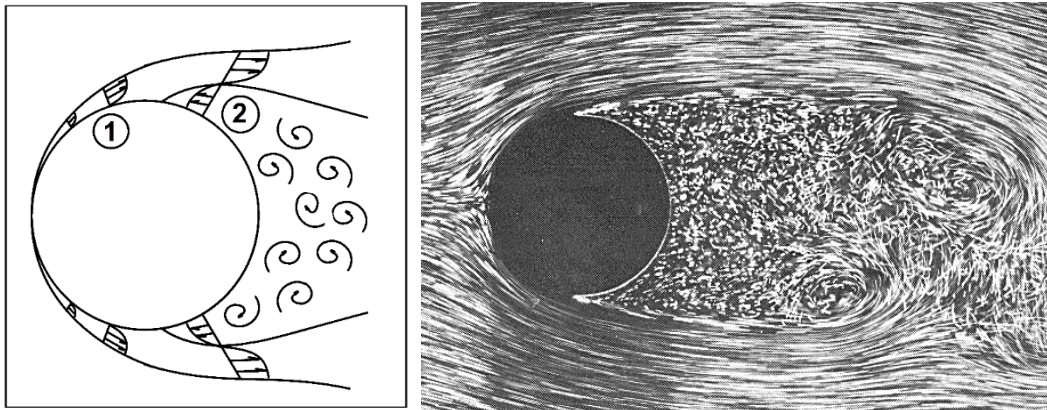


Figura 2-2. Separación de capa límite alrededor de un obstáculo (ILCE, 2015).

Otro cambio importante en las condiciones hidrodinámicas del flujo alrededor de estructuras hidráulicas, es el desprendimiento de la capa límite o separación de flujo (representada en la Figura 2-2), que genera flujos adversos y vorticidad como se muestra en el punto 5 de la Figura 2-1. Debido a que el obstáculo posee una superficie rugosa, el

flujo de agua en sus cercanías experimenta los esfuerzos cortantes producto de esa rugosidad y que hacen que la velocidad del flujo sea cero en la superficie y aumente hasta el espesor de la llamada capa límite (punto 1). Sin embargo, cuando se da un cambio brusco de dirección de flujo alrededor del obstáculo, puede ocurrir la separación del flujo a lo largo del contorno, con la destrucción de dicha capa límite y con ello, zonas de flujo adverso o contrario, (punto 2), que generan vorticidad.

La separación del flujo, además de darse por la presencia de obstáculos, puede generarse en cambios bruscos de geometría en canales de flujo. En la parte izquierda de la Figura 2-3 se puede observar experimentalmente el cambio en el perfil de velocidades del flujo por la presencia de una placa horizontal delgada donde se observa que la velocidad uniforme se ve afectada en una sección en cercanías de la placa (capa límite), en la imagen derecha, se muestran los resultados del flujo en cavidades de dimensiones que aumentan, para darse cuenta que también en esas condiciones es posible notar la separación del flujo.

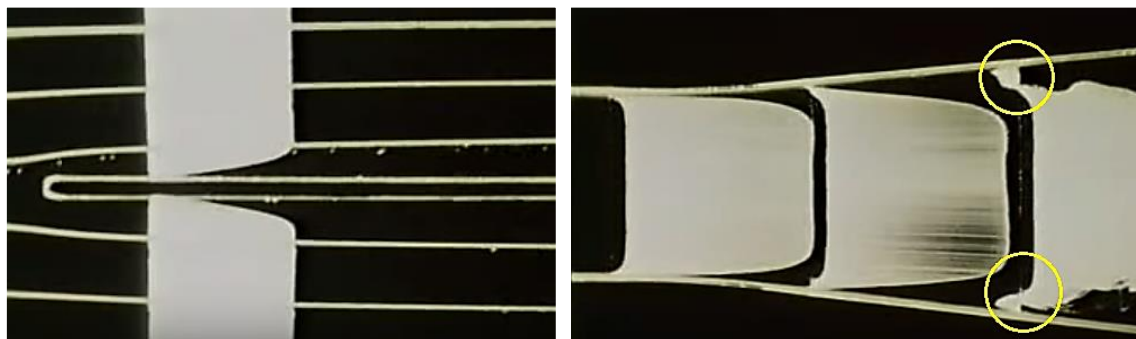


Figura 2-3. Formación de la capa límite (izq.), y separación del flujo(der.). (Abernathy, 1958)

Las fotografías fueron tomadas de un montaje experimental realizado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Harvard alrededor de los años 50, donde para simular el perfil de velocidad utilizaron burbujas de hidrógeno producidas por electrólisis a lo largo de la profundidad del flujo de agua. Estas, gracias a mecanismos de advección-dispersión, permitían evidenciar el efecto de la viscosidad del fluido y los cambios en la dinámica del flujo. Según Abernathy (1958), en esta cavidad divergente, la capa límite aumenta su grosor de manera rápida con la correspondiente disminución del esfuerzo cortante de la pared, en este caso se tiene un gradiente de presiones en aumento asociado a una

disminución de la velocidad media del flujo. Siempre que esta disminución de velocidades sea lo suficientemente elevada, la velocidad del flujo en alguna región de la capa límite toma un valor de cero y empieza un retroceso del flujo en esta zona.

2.2 Flujo rápidamente variado

El flujo rápidamente variado ocurre típicamente cuando las condiciones de la sección transversal o el perfil de un conducto cambian súbitamente dentro de un campo de flujo, usualmente por la presencia de estructuras hidráulicas especiales. Según Chow (1959), el flujo rápidamente variado (FRV) involucra una cantidad significativa de pérdidas de energía por turbulencia, que para muchos de los problemas de ingeniería, puede aproximarse de manera general con las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Sin embargo, existen muchos factores inciertos intrínsecos a los procesos, para los cuales la solución exacta de las ecuaciones es imposible, y para los que se hace necesario, estudios de modelación o mediciones reales en estructuras existentes, a fin de combinar la teoría con la observación.

Para el flujo uniforme y gradualmente variado, de naturaleza turbulenta, las trayectorias del flujo se asimilan a líneas de corriente paralelas, aceleraciones despreciables y por ende una distribución de presiones aproximadamente hidrostática. El FRV, en cambio, presenta curvaturas pronunciadas generando una superficie de flujo discontinua y por ende una distribución de presiones no hidrostática. Este tipo de flujo ocurre en distancias pequeñas, por lo que las pérdidas de energía por fricción pueden ser despreciadas. Además, debido a los cambios de geometría repentinos, puede darse el fenómeno de separación de capa límite y la formación de vórtices (Figura 2-4).

Para el caso de la EEARC, donde existirán diferentes tipos de transiciones de geometría en planta y en perfil, y en distancias muy cortas, cobra especial importancia el estudiar los efectos de las contracciones y expansiones del flujo y su carácter rápidamente variado. Tales transiciones son usualmente empleadas para cambiar el alineamiento o sección transversal de un canal, y requieren de un diseño que minimice las pérdidas de energía, y garantice un cambio de magnitudes hidráulicas de forma suave.

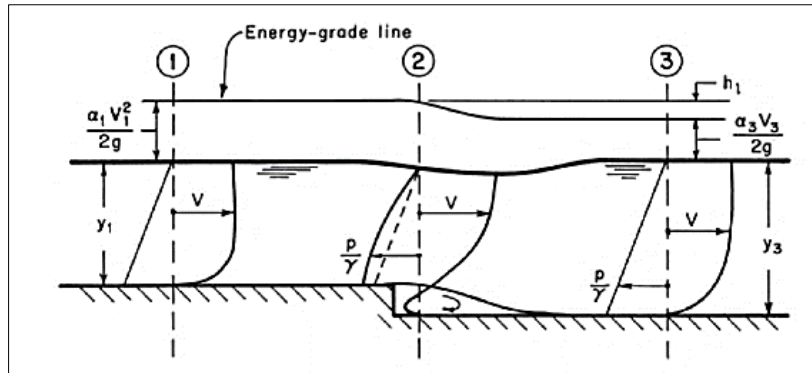


Figura 2-4. Comportamiento del flujo en caída brusca (Chaudhry, 2007).

Dadas las condiciones del diseño del ITC con una tubería relativamente lisa ($n=0.013$), se espera un flujo de alta velocidad, pero subcrítico en la conducción. Por este motivo, las transiciones para la EEARC se estiman sean de tipo subcríticas, y se hace necesario el estudio del efecto de las contracciones y expansiones en los canales para este régimen de flujo. Formica (en Chow 1959) y otros autores como Smith y Yu (en Chaudhry 2007) han estudiado y llevado a cabo numerosos experimentos para contracciones y expansiones de este tipo. El primero planteó los diseños que se muestran en la Figura 2-5, donde encontró que, en general, para una condición de esquinas bruscas, las expansiones súbitas presentaban pérdidas de energía mayores que aquellas en contracción súbita. Sin embargo, halló después que la pérdida de energía puede disminuirse considerablemente si las esquinas agudas en los cambios de geometría eran suavizadas (Figura 2-6).

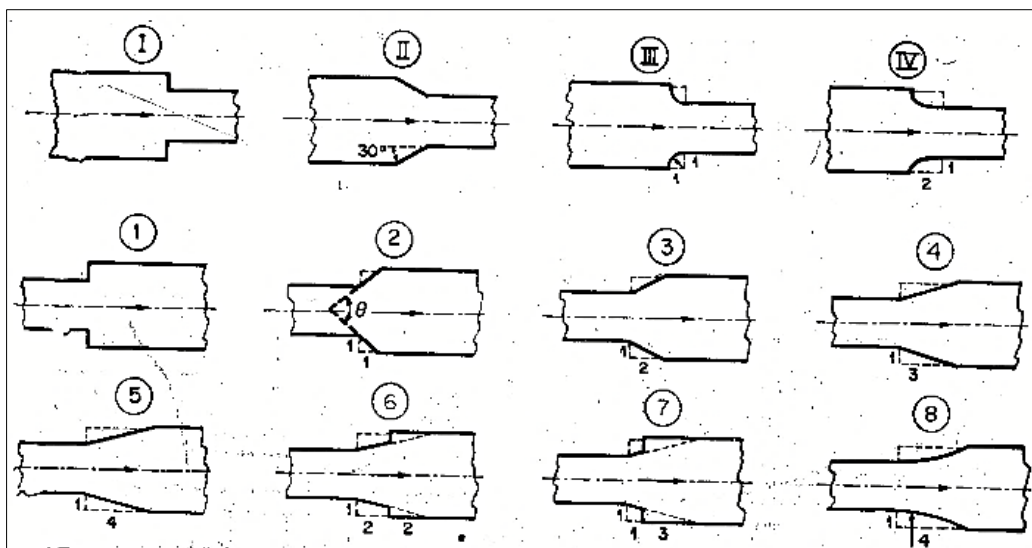


Figura 2-5. Diseño de expansiones y contracciones súbitas (Formica en Chow 1959).

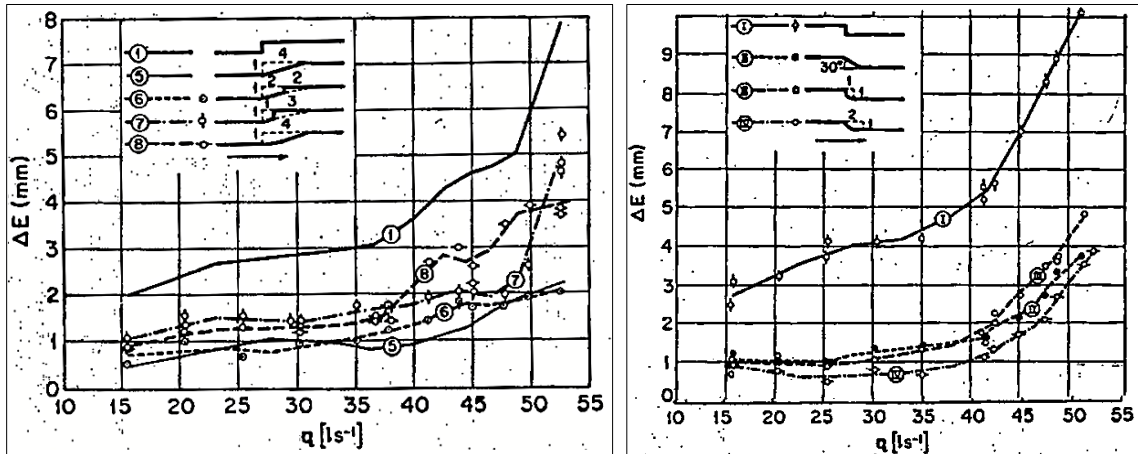


Figura 2-6. Pérdidas de energía en transiciones súbitas (Formica en Chow 1959).

En la práctica, se requieren transiciones en canales donde se deba cambiar la sección transversal del conducto de una geometría determinada a otra. En la literatura, se mencionan algunas alternativas de transiciones para cambios de geometría rectangular a trapezoidal o rectangular a rectangular. En el caso de la EEARC, se requiere una transición del conducto circular (ITC) a rectangular, varias transiciones rectangulares con diferente ancho; y una final con geometría compleja en los cárcamos de bombeo como se presentó en la Figura 1-4.

El diseño de transiciones de sección es bastante complejo y rara vez totalmente adecuado, dada la tendencia del flujo a mantener su ancho inicial sin expandirse bruscamente hacia un ancho mayor. Normalmente la contracción de la sección es menos complicada. En el caso de expansiones se recomienda que sean muy graduales (ángulos bajos), y tan largas como sea posible, aún para flujos totalmente subcríticos. En el caso de flujos supercríticos o aún casi-críticos, ángulos muy bajos, del orden de 15 a 20° son casi siempre necesarios.

2.3 Transporte de sedimentos

Los sedimentos son partículas sólidas que se forman durante el proceso de intemperización de las rocas expuestas a los elementos climáticos, lo que hace que los granos tengan formas y tamaños irregulares, pero que después tienden a redondearse por procesos de transporte. Es bien sabido que estas partículas alcanzan una distribución de tamaños y gradación determinada que dependerá en gran medida de las condiciones

hidráulicas, naturaleza del canal y cuenca de drenaje. En cuanto al fenómeno de transporte, este dependerá de varios factores entre los que se encuentran las características físicas y geométricas del material y grano, y las características físicas tanto del fluido como del flujo.

Los sedimentos tienen una influencia directa en el funcionamiento, operación y mantenimiento de diversas obras de ingeniería y estructuras hidráulicas. En el caso de sedimentos arrastrados por el agua, dondequiera que el flujo disminuya su velocidad y por ende su capacidad de transporte, se generan depósitos con pérdida de parte de la sección transversal. Se considera que es la carga total de sedimentos aquella que finalmente contribuirá al desarrollo de este fenómeno, con partículas de diferente tamaño depositándose según sea la velocidad y la profundidad del flujo, en forma diferencial de acuerdo con su tamaño. La carga más gruesa, que se mueve por arrastre sobre el lecho, tiene mayor efecto en la alteración de los cauces y pisos de las estructuras, y es de mayor interés en el caso de estructuras hidráulicas como la Estación Elevadora de Canoas.

El tamaño y el peso específico de las partículas de sedimento son parámetros de gran importancia en el caso de zonas propensas a la sedimentación por cambios de velocidad. Si se analiza una partícula sólida en caída libre en un fluido, se tiene que su velocidad de asentamiento estaría es función de su diámetro representativo (D), su densidad relativa (S_s), la gravedad (g) y un coeficiente de arrastre (C_D). Es importante definir esta velocidad de caída, ya que influirá finalmente, junto a otros factores como la turbulencia del flujo, en el comportamiento y tendencia de los sedimentos a transportarse en suspensión, arrastre o saltación.

$$U_s = \sqrt{\frac{4gD}{3C_D}(S_s - 1)} \quad (2.1)$$

El coeficiente de arrastre C_D ha sido ampliamente estudiado, y depende del número de Reynolds (Re) asociado a la partícula y del tamaño de la misma (Figura 2-7). Se puede observar que, para números de Reynolds bajos, el coeficiente de arrastre es independiente de la forma de la partícula, y para valores altos es independiente de Re con valores diferentes en función de la forma de grano.

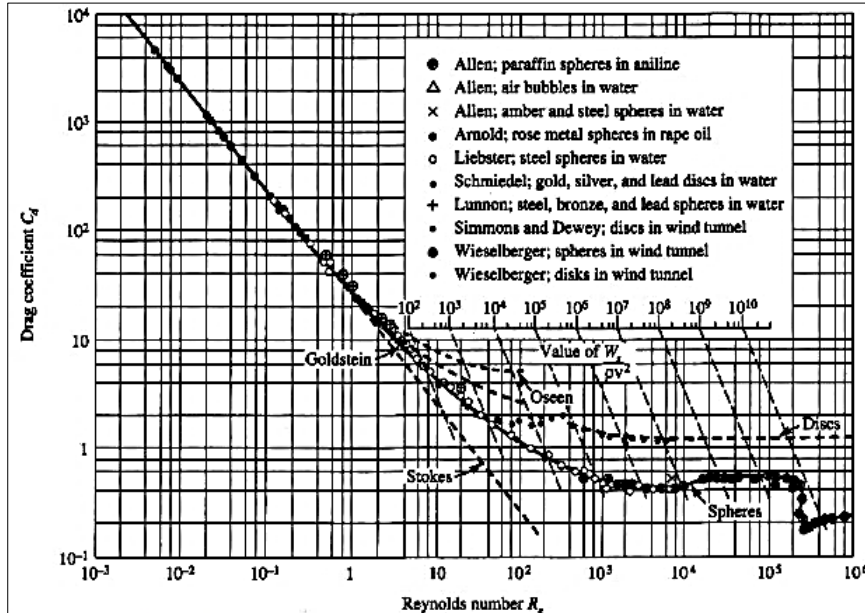


Figura 2-7. Coeficiente de arrastre como función de Re y de la geometría de la partícula (Simons & Senturk, 1992)

Es importante también entender la forma en que los sedimentos reposan estando sumergidos. Generalmente se estudia el ángulo θ de la pendiente del depósito de material granular, bajo la condición de equilibrio incipiente. Este estado se alcanza cuando el peso sumergido de la partícula en dirección del deslizamiento, iguala la fuerza de fricción sobre la misma (Figura 2-8).

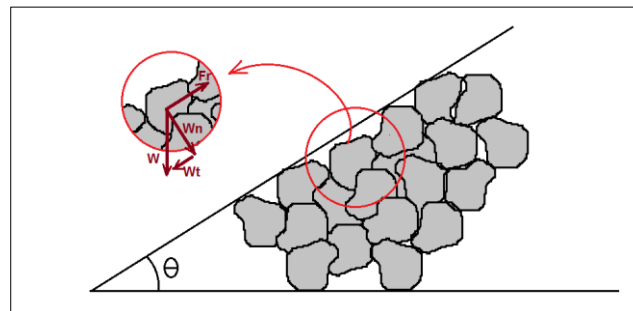


Figura 2-8. Ángulo de reposo material granular.

La fuerza de fricción es descrita por la ley de fricción de Coulomb siendo directamente proporcional al peso sumergido normal por una constante de proporcionalidad igual a la tangente del ángulo θ . Este ángulo de reposo puede tomar valores entre 30° y 40° para

materiales no cohesivos. Materiales pobremente gradados y angulares tienen una mayor tendencia al trabamiento, y por ende un mayor ángulo de reposo.

Según García (2008), los factores que afectan la movilidad de los granos pueden ser resumidos en dos: por un lado, la aleatoriedad del proceso de la turbulencia del flujo y movimiento de las partículas, y por otro lado, las fuerzas que actúan sobre las mismas, siendo principalmente las de sustentación (F_s), arrastre (F_a), fricción (F_r) y el peso sumergido (W). En presencia de flujo muy turbulento, las fluctuaciones súbitas de velocidad y presión impiden la ocurrencia de una condición clara de inicio de movimiento, existiendo una probabilidad no nula, pero en algunos casos despreciable, de que esto suceda aún en caudales bajos

Existen varios criterios y metodologías para estimar el inicio de movimiento de los sedimentos y materiales granulares, que podrían dividirse en tres clases: aquellos basados en esfuerzos de corte crítico, en velocidad crítica y aquellos que definen este movimiento a partir de otros parámetros. Las derivaciones teóricas para la definición de inicio de movimiento generalmente desprecian las fuerzas turbulentas actuantes, fuerzas que pueden llegar a ser significativas en algunos casos donde la hidrodinámica del flujo cambia radicalmente, además de considerar como válidas una serie de suposiciones adicionales. Entre estos supuestos se resaltan: flujo permanente, flujo uniforme, flujo turbulento, canales caracterizados por una profundidad media H y velocidad U bien definida, y la suposición de que todas las fuerzas sobre la partícula actúan en el centroide de la misma.

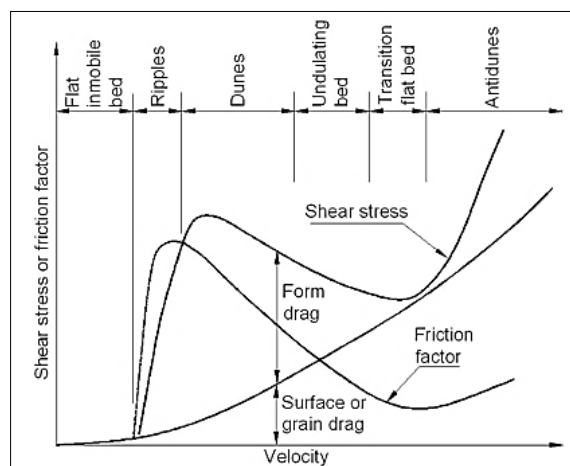


Figura 2-9. Esfuerzo cortante y factor de fricción en función de la velocidad media del flujo (Raudkivi en García 2008).

Los procesos de transporte y depositación de sedimentos cambian las condiciones de rugosidad de los canales a partir de la generación de formas de lecho, y dependen de parámetros hidráulicos como la velocidad, profundidad, y la naturaleza del material granular. La Figura 2-9 muestra, para canales con lecho de sedimentos, cómo las formas de este afectan la magnitud del esfuerzo cortante total y por ende la resistencia al flujo. Se observa que esta variabilidad depende del flujo y que este esfuerzo puede llegar a ser considerable por la influencia de estas formas. Se nota además, que la expresión que relaciona este comportamiento de esfuerzo de corte estaría dada como se muestra en la ecuación (2.2).

$$\tau_T = \tau' + \tau'' \quad (2.2)$$

Donde τ_T es el esfuerzo de corte total, τ' es el esfuerzo debido a la rugosidad de grano y τ'' es el esfuerzo adicional causado por las formas de lecho.

Para estructuras hidráulicas complejas como es el caso de la EEARC, donde no hay el suficiente espacio para desarrollarse adecuadamente el flujo, los sedimentos se depositan en función de la hidrodinámica propia de la estructura, y podrán generarse barras que afectarán la resistencia del flujo de forma similar a como las formas de lecho afectan la hidráulica de los canales. En todo caso, se debe cumplir con el balance de masa de sedimentos en los depósitos del mismo, donde se satisface que el cambio en el volumen es proporcional al cambio de la carga sólida que ocurre en un tiempo y a las posibles tasas de erosión y depositación que se dan, (ecuación de Exner).

Para el transporte de sedimentos en canales abiertos, siempre que estén en equilibrio entre erosión y depositación, los parámetros de interés para estudio son aquellos que determinan la tasa de transporte por arrastre y la tasa de transporte en suspensión. El parámetro de intensidad de transporte Φ_* depende del parámetro de intensidad de flujo Ψ_* estando en función de la densidad relativa de la partícula S_s , el diámetro D , el radio hidráulico R_h , la velocidad de sedimentación U_s , la velocidad de corte U_* y la pendiente de la línea de energía del canal S_e , como se muestra en las expresiones (2.3):

$$\Phi_* = \frac{i_B q_B S_e}{\sqrt{(S_s - 1)} \cdot D^{3/2}} = f(\Psi_*) \quad (2.3)$$

$$\Psi_* = \frac{(S_s - 1)D}{R_h S_e} = f\left(\frac{U_s}{U_*}\right)^2$$

Por otro lado, el parámetro de movilidad de la ecuación de Rouse (Z) para los sedimentos en suspensión está definido como muestra la ecuación (2.4), evidenciando que tanto para condiciones de transporte de fondo y suspensión hay una dependencia de la relación entre U_s y U_*

$$Z = f\left(\frac{U_s}{U_*}\right) \quad (2.4)$$

Sin embargo, dado que en los canales de la Estación se espera que no existan condiciones de equilibrio sedimentológico, predominando la depositación, es necesario tener en cuenta otros factores adicionales. La ecuación general para la depositación está definida como:

$$\frac{C(x)}{C_0} = f\left(\frac{U_s t}{H}, \frac{U_s}{U_*}\right) \quad (2.5)$$

Donde C es la concentración a una distancia x , siendo $x = U_s t$, U_s es la velocidad de sedimentación, U_* la velocidad de corte y H la profundidad de lámina de agua del canal. Esta ecuación es válida para cualquier condición hidrodinámica del flujo, desde flujo laminar hasta flujo turbulento. Siempre que la velocidad U_s sea mucho mayor a la velocidad U_* la ecuación (2.5) se reduce a:

$$\frac{C(x)}{C_0} = \frac{U_s t}{H} \quad (2.6)$$

Por el contrario, en el caso de partículas finas en condición de flujo turbulento, cuando U_s es mucho menor que U_* la ecuación (2.5) se reduce a:

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left(-\frac{U_s t}{H}\right) \quad (2.7)$$

2.4 Exclusión de sedimentos

Luego de estudiar algunas consideraciones relevantes en cuanto a sedimentos y su transporte, es importante revisar la forma de controlarlos. Puntualmente, para el caso de estudio en la Estación Elevadora de Canoas (EEARC), es importante repasar los estudios realizados en cuanto a exclusores de fondo para material de arrastre.

Los exclusores de fondo son utilizados para expulsar y controlar el material de arrastre que pudiese generar inconvenientes si no fuese retirado. Existen diferentes formas de exclusión de sedimentos, pero en este trabajo se analizaron aquellos operados hidráulicamente. Numerosos autores han estudiado la derivación de agua y sedimentos en ríos, los cuales estudian el fenómeno como una relación entre la cantidad derivada de agua y de sedimentos (Ordoñez y otros, 2008).

Si se analiza la tasa de derivación de los sedimentos a través de bocatomas laterales, la Figura 2-10 recopila los resultados obtenidos en 8 estudios. La gráfica presenta dos curvas, una recta a 45° que representa la exclusión de los sedimentos en suspensión en igual proporción que la exclusión de agua, y una curva que muestra los resultados encontrados experimentalmente, los cuales establecen una relación de aproximadamente el doble de la exclusión de sedimentos de arrastre respecto de la exclusión de agua. Se observa que, para una derivación de flujo de agua de aproximadamente el 45%, se alcanza una derivación de sedimentos cercano al 90%, resaltando su gran efectividad (Ordoñez y otros, 2008).

La forma de derivación de sedimentos a partir de exclusiones laterales ha sido utilizada frecuentemente en modelos físicos hidráulicos como los que se encuentran en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Estudios anteriores como el de Vanoni (1972), muestran que el ángulo del exclusor con respecto al flujo tiene cierta influencia en cuanto a la eficiencia de derivación de sedimentos, sin embargo, los ángulos más cercanos a los 90° resultan más económicos y sencillos de construir. Vanoni aconseja tomar un ángulo de exclusión entre 30° y 45°.

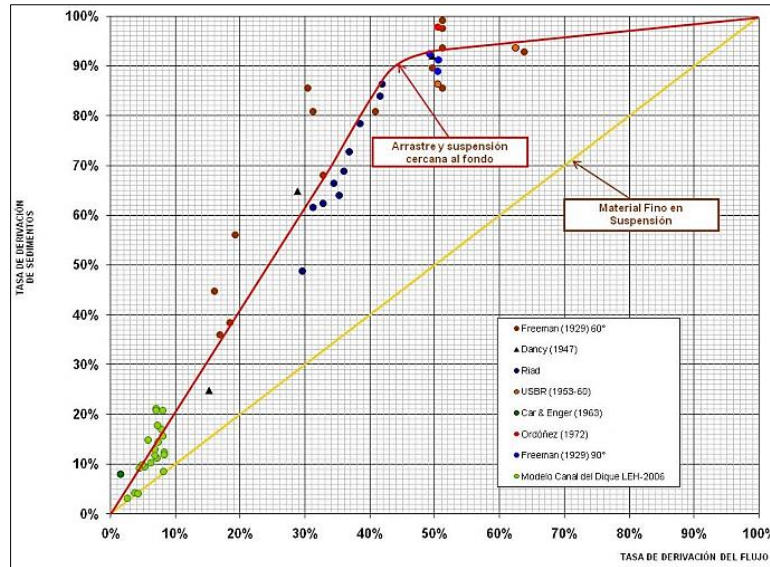


Figura 2-10. Exclusión de sedimentos vs exclusión de agua en exclusores laterales. (Ordoñez y otros, 2008).

En el trabajo de Ordoñez y otros (2008), se hizo un estudio del comportamiento de los exclusores de sedimentos a 45° en lechos arenosos en canales, donde se realizó la construcción de una estructura semicircular en el fondo de un canal recto y con la orientación mencionada. Como se observa en la Figura 2-11, la cantidad de flujo derivado se regula con una válvula y se transporta hasta un sitio final de sedimentación. Para la experimentación se utilizó arena para conformar el lecho en un rango de granulometría fina a media de tal manera que se diera una condición de transporte generalizado. La sección semicircular cóncava del exclusor se enfrenta sesgadamente al flujo de agua y opera constantemente sumergida.

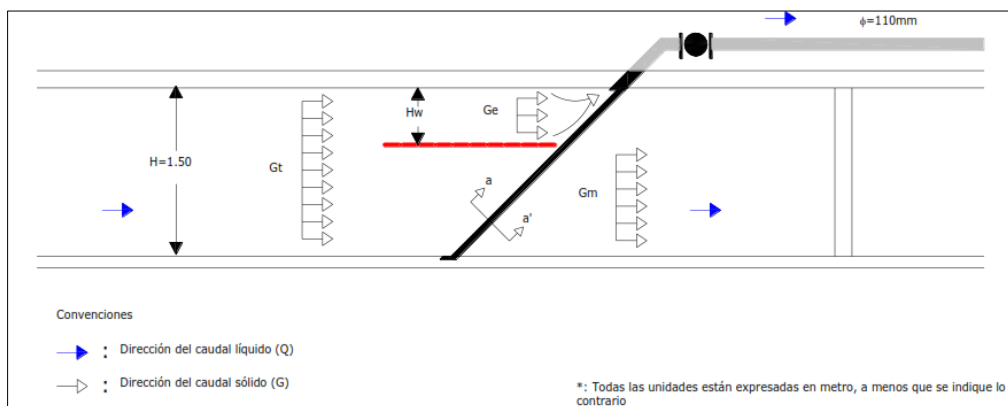


Figura 2-11. Excluser de sedimentos a 45° (Ordoñez y otros, 2008).

Para la fase de recopilación de información se midió la velocidad del agua y el caudal del canal, de igual forma se estimó el flujo derivado a través del exclusor y la cantidad (en peso) del material que fue excluido por el sistema. Finalmente, conociendo la tasa de caudal sólido ingresado, se procesó la información medida y se obtuvo como resultado, que al regular la válvula de tal forma que el caudal líquido derivado no fuese superior al 15% del caudal transportado en el canal principal, se lograban porcentajes de exclusión de sedimentos de hasta un 60%. Los autores comentan que, comparando los resultados obtenidos en exclusores laterales donde la relación entre la tasa de derivación de sedimentos y la tasa de derivación de flujo tuvo un valor hasta de 2, para exclusores a 45° resultó con una relación hasta de 4.

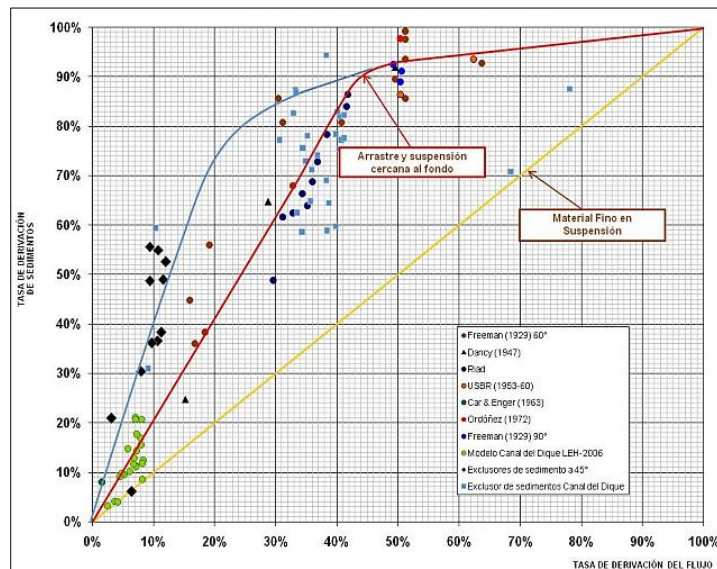


Figura 2-12. Exclusión de sedimentos vs exclusión de agua en exclusores a 45° (Ordoñez y otros, 2008).

2.5 Naturaleza de los sedimentos en alcantarillados

Los conductos de alcantarillado se diseñan para que tengan un carácter autolimpiante, donde se espera que los sedimentos estén en continuo movimiento sin depositación. Sin embargo, debido a la intermitencia y variabilidad de los caudales en estos sistemas, así como a las características de las aguas y los sedimentos presentes, puede eventualmente ocurrir una considerable sedimentación de material especialmente durante caudales bajos.

A medida que la población aumenta en un determinado territorio, la preocupación acerca de los vertimientos de cargas contaminantes a cuerpos hídricos también aumenta. Los sedimentos son uno de los principales medios de transporte de agentes patógenos, pero también de nutrientes, que fomentan el crecimiento de vida vegetal en las aguas receptoras, y por ende la eutrofización, con la consecuente disminución del oxígeno disuelto que imposibilita el sostenimiento de la vida acuática.

En el Reino Unido, la CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) ha desarrollado extensos estudios relacionados con la presencia de sedimentos en los sistemas de alcantarillados, encontrando que los problemas más comunes relacionados con estos materiales son los taponamientos, inundaciones, cambios de la calidad de agua y aumentos inesperados de caudal (por desatascamientos súbitos). Según ellos, las cargas y tipos de sedimento dependen de la localización geográfica, tipo de alcantarillado, y condición hidrológica local, siendo aportados principalmente por escorrentía (Ghani, 1993). Muestras realizadas en 11 ciudades del Reino Unido, y estudios realizados por May (1982) y otros investigadores como Ackers (1964), han mostrado que los sedimentos son generalmente bien gradados con un D50 entre 0.1 y 10 mm (para varias regiones de Europa como Francia, Reino Unido, Alemania y Bélgica).

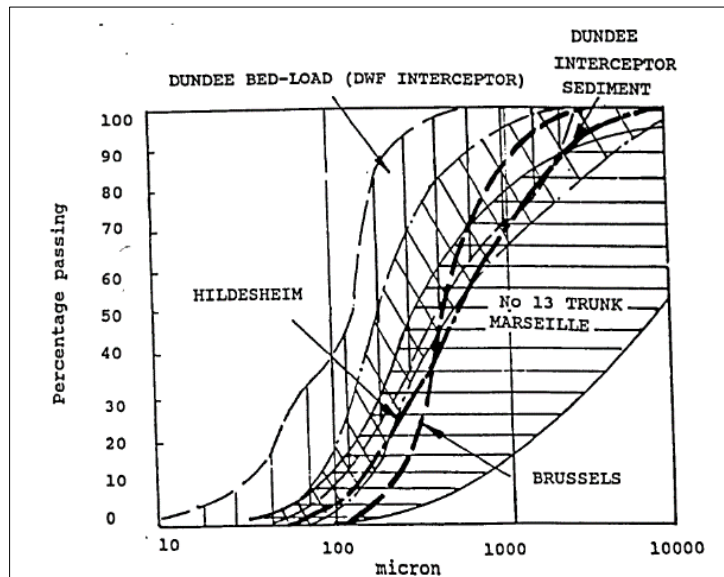


Figura 2-13. Tamaños de partículas típicas en alcantarillados (Ghani,1993).

En otro estudio llevado a cabo en Dundee, Escocia, por los investigadores Arthur y otros (1996), se realizaron tres muestreos de sedimentos en alcantarillados en los que se midieron características físicas y bioquímicas del material granular transportado. Se encontraron las gradaciones granulométricas que se presentan en la Figura 2-14, donde a la izquierda, más del 80% del material resultó con diámetros superiores a 1 mm, y a la derecha se muestra la variabilidad de esta información en función del lugar analizado.

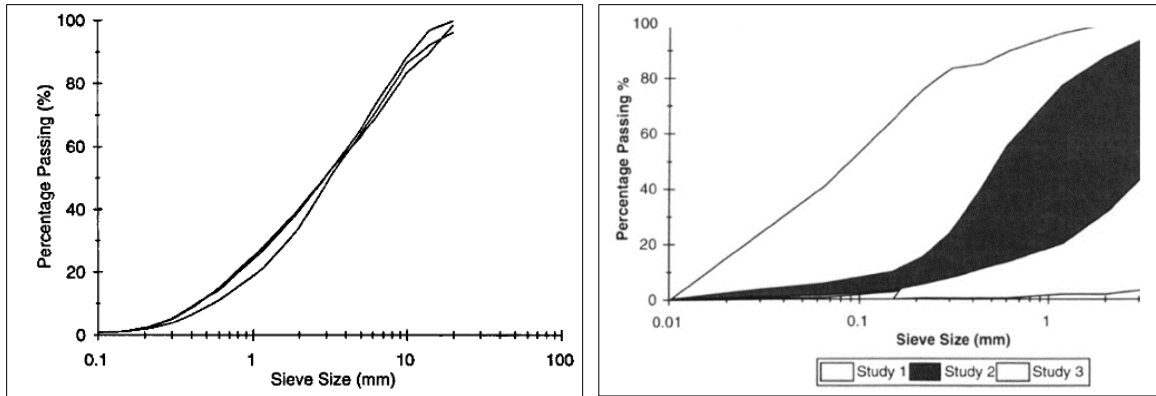


Figura 2-14. Granulometrías en alcantarillados de Escocia (Arthur y otros, 1996).

De igual manera, Ghani y otros (2000), estudiaron las características granulométricas de los sedimentos en drenajes urbanos de Malasia. Como se muestra en la Figura 2-15, se observa que alrededor del 50% de las partículas presentan diámetros superiores a 1 mm, llegándose a encontrar tamaños superiores a 1 cm.

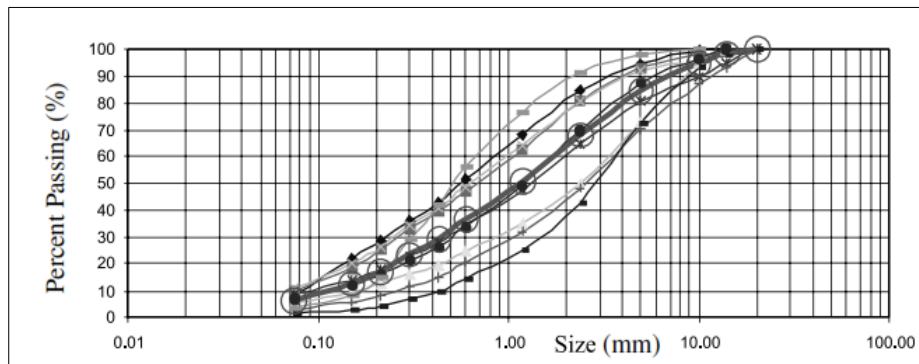


Figura 2-15. Granulometrías encontradas en Alor Setar (Ghani y otros, 2000).

2.6 Modelación física en hidráulica

Un modelo físico en hidráulica es, de acuerdo con numerosos investigadores, la combinación de un conjunto de elementos y materiales que representan los contornos y propiedades dinámicas de un campo real de flujo, de forma y funcionamiento homólogo, al cual se le denomina prototipo (Ordoñez, 2009).

En ingeniería civil son comunes los proyectos de infraestructura de gran envergadura y de alto costo, donde se hace necesario estudiar el comportamiento del flujo en las estructuras, a través de modelación física o matemática, y así aproximar su respuesta frente a posibles escenarios normales y críticos de funcionamiento futuro. La modelación física es casi siempre indispensable cuando los campos de flujo son complejos y difíciles de representar matemáticamente en todo el detalle requerido.

La base de la modelación física es el análisis dimensional, donde se estudian las dimensiones físicas de los parámetros que gobiernan las condiciones de flujo. Generalmente, se utiliza este análisis para agrupar parámetros adimensionales característicos y estudiar su comportamiento y variabilidad frente a estos fenómenos físicos. Entre los parámetros adimensionales más utilizados en hidráulica, se resaltan el número de Reynolds (Re) que relaciona la influencia de la inercia y viscosidad de un flujo, el número de Froude (F) que relaciona la inercia y la acción de la gravedad, el número de Weber, (We) que incluye los efectos de la tensión superficial de los fluidos, entre otros.

Se define como **magnitud** física una cantidad medible de un sistema físico, (por ejemplo la velocidad), y como **dimensión** de esa magnitud física aquello que la caracteriza y describe al estudiarla, (en mecánica, las dimensiones fundamentales son la longitud, la masa, el tiempo y la temperatura). **Escala** por su parte, es aquella magnitud o factor de proporcionalidad adimensional que relaciona magnitudes físicas correspondientes u homologas entre modelo y prototipo. Para que un modelo físico pueda representar los fenómenos del flujo que ocurren en el prototipo, debe satisfacer condiciones específicas de similitud o semejanza geométrica, cinemática y dinámica (Duarte, 2017).

La **similitud Geométrica** se da cuando todas las dimensiones espaciales del prototipo y modelo guardan una relación constante o escala denotada como **Lr** la cual se define como:

$$\frac{L_p}{L_m} = L_r \quad (2.8)$$

Donde L_p es la dimensión de longitud del prototipo (realidad, naturaleza), L_m es la dimensión de longitud del modelo y L_r es la escala geométrica, la cual siempre es mayor a 1.0 en modelos construidos a escala reducida.

La **similitud Cinemática** consiste en la semejanza del movimiento de las partículas de agua y de las sustancias que el flujo transporta en zonas homólogas de prototipo y modelo. De esta manera, entre un modelo y su prototipo habrá similitud cinemática siempre que las partículas homólogas en movimiento cumplan la semejanza geométrica, y las razones de los tiempos homólogos de los eventos sean iguales (Duarte, 2017). Esto implica que:

$$\frac{U_p}{U_m} = U_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (2.9)$$

Donde U_p es la velocidad en una cierta sección de flujo del prototipo, U_m es la velocidad en la sección de flujo homóloga en el modelo, U_r la escala de velocidad; L_r es la escala de longitud, y T_r la escala de tiempo.

La similitud Dinámica por su parte, existirá cuando la relación de fuerzas homólogas entre modelo y prototipo sea una constante f_r . Se debe cumplir entonces que:

$$\frac{f_p}{f_m} = f_r \quad (2.10)$$

Donde f es la fuerza originada en el flujo del prototipo, f_m es la fuerza homóloga en el modelo y f_r la escala de fuerzas. Para que exista la similitud dinámica perfecta, la misma escala de fuerzas ha de ser utilizada para las fuerzas gravitacionales, fuerzas inerciales, fuerzas de presión, fuerzas viscosas, y fuerzas de tensión superficial. Esto rara vez es logrado, por lo cual los modelos solo tienen similitud dinámica parcial, de acuerdo con aquellas fuerzas que son predominantes en cada uno de los fenómenos estudiados.

Según la fuerza más relevante en el fenómeno físico, los modelos se clasifican en función del parámetro adimensional correspondiente a la relación de fuerzas de ese grupo en particular. De esta manera, se puede hablar de modelos de Reynolds, Froude, Weber, entre otros, donde la razón entre el parámetro de interés del modelo y prototipo debe ser igual a uno.

Además de lo anterior, cabe resaltar que las escalas siguen de igual manera un conjunto de reglas aritméticas básicas para tratarlas, de donde se resaltan por su uso y simplicidad las de adición, sustracción, multiplicación y división, (Ordoñez, 2009), como se presenta a continuación:

- Multiplicación y división: Si dos o más magnitudes físicas están relacionadas entre sí por multiplicaciones o divisiones simples, las escalas se multiplicarán y dividirán de la misma forma.

$$\text{Si } A = BC \quad \text{entonces } A_r = B_r C_r \quad (2.11)$$

- Adición y sustracción: Si dos o más magnitudes físicas están relacionadas entre sí por operaciones de adición y sustracción, necesariamente las escalas de cada término deben ser iguales.

$$\text{Si } A = B + C \quad \text{entonces } A_r = B_r = C_r \quad (2.12)$$

En algunos casos, los modelos físicos requieren de distorsión de escalas para solucionar inconvenientes durante el proceso de concepción de la modelación. En ocasiones, se hacen distorsiones geométricas que permitan solucionar inconvenientes en la construcción del modelo, cuando la profundidad del campo de flujo es mucho menor que su extensión superficial o que podrían aumentar considerablemente su costo.

Los fenómenos físicos en hidráulica, que en el prototipo involucran el agua, en el modelo se estudian utilizando comúnmente el mismo fluido, principalmente por su facilidad de acceso, uso, seguridad y bajo costo. Esto implica una restricción importante en la modelación física que debe ser considerada para una adecuada interpretación de

resultados. En el caso de los canales abiertos, la fuerza de gravedad domina la naturaleza del movimiento, en tanto que los efectos de la viscosidad se concentran generalmente en los contornos sólidos del campo de flujo. La modelación perfecta requeriría el cumplimiento simultáneo tanto de la igualdad de los números de Froude y Reynolds, o sea:

$$Re_r = \frac{\rho_r U_r L_r}{\mu_r} = 1 \qquad Fr = \frac{U_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1$$

Donde ρ_r es la escala de densidad, μ_r la escala de viscosidad dinámica y g_r la escala de gravedad. Sin embargo, al utilizar el mismo fluido tanto en modelo como en prototipo estas escalas serían igual a 1 y por tanto, para una modelación de Froude y Reynolds simultánea bajo estas condiciones se requeriría que:

$$U_r = \frac{1}{L_r} \qquad U_r = \sqrt{L_r}$$

Lo cual solamente es posible de satisfacer para una escala $L_r = 1$, y por tanto, este tipo de modelaciones sólo sería posible realizarlas operando directamente sobre el prototipo. Por este motivo, y como se comentó, dependiendo del fenómeno físico que se esté estudiando, se da prioridad a una de las fuerzas relevantes en el proceso, considerando al mismo tiempo los factores de escala o aproximaciones que puedan requerirse.

Para finalizar, se resalta el trabajo de Sutherland y Barfuss (2011), los cuales hacen un análisis de la modelación física y mencionan ciertas ventajas, desventajas y oportunidades futuras. Como ventajas, se resaltan las siguientes:

- Reproducción natural de fenómenos físicos altamente no lineales, que no están completamente entendidos, por ejemplo, fuerzas de impacto en estructuras, resaltos hidráulicos, separación de flujo, vórtices, etc.
- Puede experimentarse en un corto periodo de tiempo una gran cantidad de caudales de flujo e hidrogramas.

- Es una metodología bien estudiada, comprobada y confiable, lo que la hace una forma reconocida para estudio de fenómenos complejos.

Como desventajas, se resaltan los siguientes puntos:

- Efectos de escala, donde los criterios de similitud dinámica no pueden satisfacerse simultáneamente.
- Dependiendo de la complejidad del fenómeno, del detalle y tipo de información que quisiese obtenerse del experimento, la construcción de un modelo físico puede ser costoso y requerir bastante tiempo.
- Si no se cuenta con equipos adecuados de medición, la obtención de información del modelo puede llegar a incluir niveles de incertidumbre elevados. Esta incertidumbre puede deberse a errores aleatorios o sistemáticos.

Finalmente, como oportunidades futuras para este tipo de modelación, se resaltan los siguientes puntos:

- Perfeccionamiento y desarrollos de sensores que pudiesen medir y generar series de tiempo 1D, 2D o 3D de parámetros de interés. Según los autores, estos instrumentos están siendo estudiados para implementar tecnología óptica y acústica.
- De la mano con el punto anterior, al desarrollarse la capacidad de cómputo y manejo de información, puede procesarse de mejor manera la información recolectada de los modelos.

3. Investigación experimental

3.1 Alcance general

1. Mejorar las condiciones del diseño básico de la Estación en el tema de distribución del caudal en las tres cámaras de cribado y los dos cárcamos de bombeo.
2. Mejorar el sistema de remoción de sedimentos gruesos de la Estación, de diámetros inferiores a 6 cm, que es la separación de diseño de las rejas de cribado, logrando que la mayor cantidad posible de gravas de todo tamaño hasta ese valor puedan ser removidas antes de que sean succionadas por las bombas centrífugas.
3. Hacer ajustes en la sección transversal y el perfil de las estructuras de cribado y bombeo, para permitir las dos condiciones anteriores.

3.2 Actividades desarrolladas

1. **Definición del lugar de experimentación:** Como candidatos para lugares de experimentación se encontraron el Laboratorio de Hidráulica edificio 409 y el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (LEH) edificio 408 de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá. Se escogió el laboratorio LEH, por las facilidades que presentan sus instalaciones para el manejo y estudio de sedimentos.
2. **Generación de las propuestas para la EEARC:** Dado que no se consideró posible ensayar varias alternativas de disposición de los muros de las cámaras de cribado y cárcamos de bombeo, se propuso una sola geometría en planta y perfil de los canales, y de muros de separación de la Estación, mejorando el diseño hidráulico de la expansión de entrada y la expansión de los canales de conexión hacia los cárcamos de bombeo. Se contribuyó al análisis de alternativas de diseño hidráulico de las cámaras de cribado y de bombeo, y se introdujo una propuesta totalmente nueva de excluidores de sedimentos.

- 3. Definición de las escalas de modelación:** Se definieron iterativamente al considerar aspectos como: disponibilidad de espacio para la construcción del canal, capacidad máxima de bombeo de la instalación, disponibilidad de materiales de construcción y costos de construcción del modelo.
- 4. Planeación y construcción del modelo físico:** La construcción del modelo físico requirió de una planificación exhaustiva y refinamiento de procesos a lo largo del tiempo dedicado en esta actividad. En general, debido a la complejidad de la Estación, la construcción se realizó en distintas etapas para posteriormente realizar su acople en el sitio final de experimentación y realizar las conexiones hidráulicas necesarias.
- 5. Selección del material granular:** Para seleccionar el material granular que representaría los sedimentos en la modelación, se hizo una estimación de la gradación granulométrica que podría encontrarse en el prototipo. Posteriormente, con los diferentes materiales disponibles para la investigación, y teniendo en cuenta la cantidad y granulometría de cada uno de estos, se precisó iterativamente cuál sería la combinación óptima a utilizar.
- 6. Planeación y toma de datos experimentales:** El programa experimental llevado a cabo se basó en dos fases: una primera donde se realizó la caracterización hidráulica de la Estación sin presencia de sedimentos, en la cual se estudió únicamente el campo de flujo, midiendo variables como velocidad y las profundidades de lámina de agua en distintas zonas del modelo, y donde se evaluó cualitativamente características de turbulencia y vorticidad. Y una segunda fase experimental basada en el estudio del transporte y exclusión de sedimentos en la Estación donde se midieron espesores de depósitos de material granular, cantidad de material transportado y depositado, y gradaciones granulométricas, donde se evaluó cualitativamente la respuesta de la Estación frente a cargas de sedimentos para condiciones de caudal bajo, medio, medio alto y máximo.
- 7. Procesamiento de información y generación de informe final:** El procesamiento de la información se realizó de manera progresiva y de la mano con el desarrollo de los experimentos, dando oportunidad a ajustes de la metodología y comprobaciones de resultados. Finalmente, se realizó el presente documento donde se recopiló todo el trabajo realizado durante este tiempo, junto a la presentación de resultados, análisis, discusión y conclusiones.

4. Descripción de la instalación UISA

Las siglas UISA hacen referencia a la Unidad de Investigación de la Socavación y Agradación y es una instalación hidráulica ubicada en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (LEH) de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Está compuesta de 5 sectores: un tanque de almacenamiento de agua, un sistema de bombeo compuesto por dos bombas centrífugas, un tanque de entrada, dos canales de modelación, un canal de retorno para el regreso del agua al tanque de almacenamiento, y un sistema de sedimentación propio compuesto por un exclusor a 45° y una conducción a un tanque de Sedimentación (Flórez Otero, 2008).

En esta sección se realiza la descripción general de la UISA, ya que en su interior se realizó el estudio experimental de la Estación Elevadora de Canoas (EEARC). La caracterización física y geométrica está basada en la tesis presentada por Flórez en el año 2008. De igual forma, se realizó una evaluación del estado e integridad del sistema, además de que se identificaron las necesidades de reparación y mantenimiento.

La Figura 4-1 presenta un diagrama realizado por Flórez (2008) donde se hace la caracterización de la UISA. Para el presente trabajo experimental fue necesario realizar algunas modificaciones a la instalación de tal forma que hubiese un acople adecuado con la EEARC objeto de este estudio. Las modificaciones y consideraciones realizadas serán tratadas más adelante en este informe donde se menciona que no todos los componentes de la UISA fueron utilizados, y donde además se detalla la forma de operación del sistema.

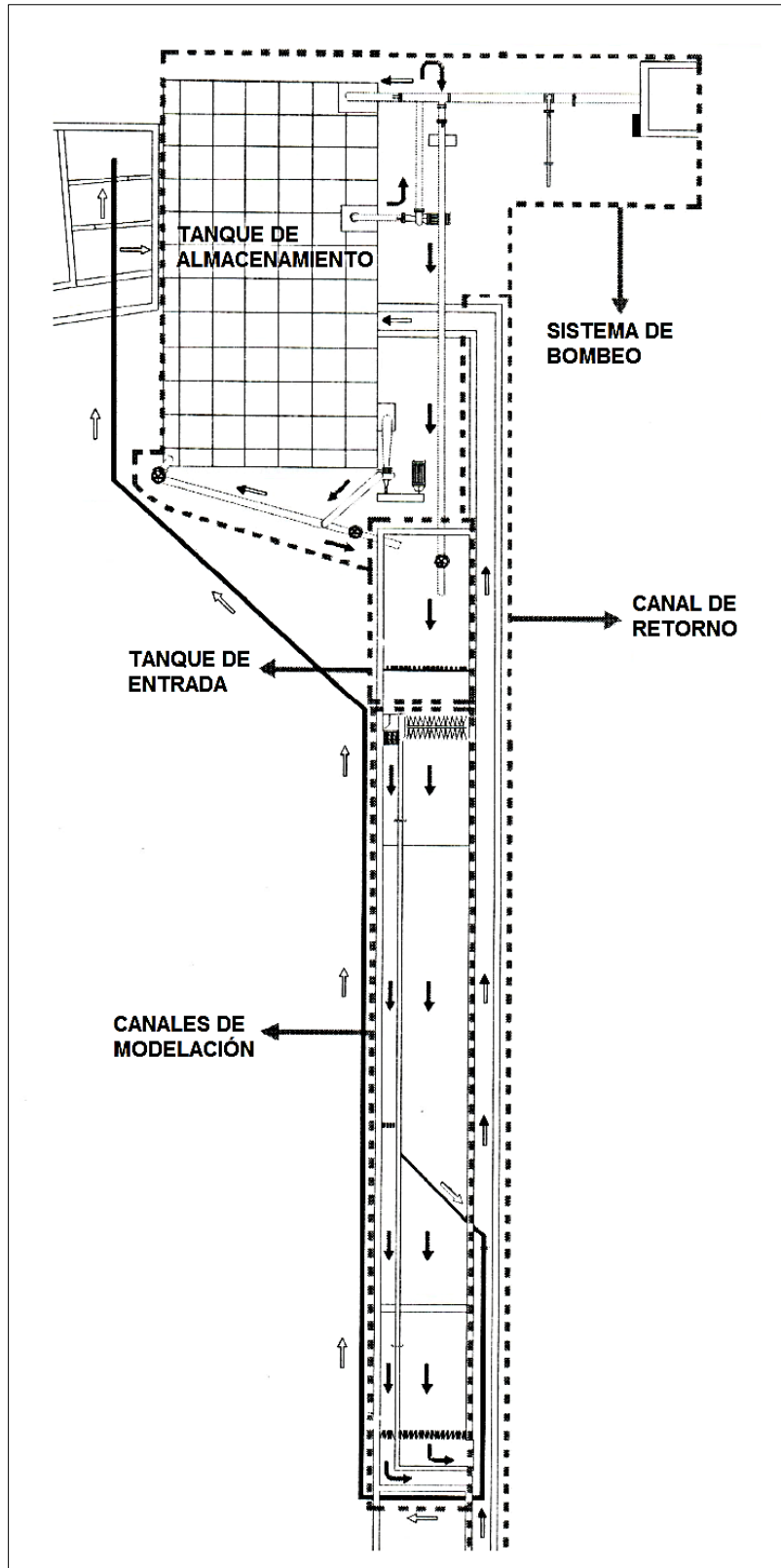


Figura 4-1. Unidad de Investigación de la Socavación y Agradación UISA – LEH (Flórez Otero, 2008).

4.1 Tanque de almacenamiento

Como se muestra en la Figura 4-1, el tanque de almacenamiento se ubica subsuperficialmente al inicio de la UISA con una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 180 m³. Está revestido en concreto y tiene una altura aproximada de 1.50 m abarcando un área de 120 m². Está sometido a presión atmosférica y tiene una cubierta de losas cuadradas de concreto reforzado removibles. El tanque es abastecido de agua potable en los momentos en que requiere de limpieza o mantenimiento. Es importante resaltar que no solo la UISA toma de sus aguas, sino también otros modelos construidos en el laboratorio, como por ejemplo aquel destinado al estudio del Canal del Dique y río Magdalena.

Según lo observado a lo largo de las prácticas experimentales y trabajos en el laboratorio, el tanque de almacenamiento se encuentra en buenas condiciones. Se evidenciaron algunas pequeñas filtraciones, pero en general no causaron ningún inconveniente con el trabajo realizado.

4.2 Sistema de bombeo

El Sistema de Bombeo de la UISA (Figura 4-2) está compuesto por los equipos e instalaciones que proveen de agua a los modelos del laboratorio. Consta de dos bombas centrífugas con capacidades de 55 l/s (bomba B1), y 100 l/s (bomba B2), 8 válvulas reguladoras de caudal, y tuberías de acero galvanizado para conducir el agua hacia los tanques superficiales y de entrada.

La bomba B1 realiza la succión a través de una tubería de hierro de 150 mm que en su extremo consta de una válvula de pie tipo check, y descarga el flujo a través de una tubería de hierro de 150 mm con posibilidad de retorno hacia el tanque de almacenamiento (Retorno 1) y conducción hacia el tanque de entrada de la UISA u otros modelos del laboratorio. La bomba B2 realiza la succión a través de una tubería de hierro de 200 mm que en su extremo consta de una válvula de pie tipo check, y descarga el flujo a través de una tubería de hierro de 150 mm con posibilidad de retorno hacia el tanque de almacenamiento (Retorno 3) o conducción hacia el tanque de entrada de la UISA.

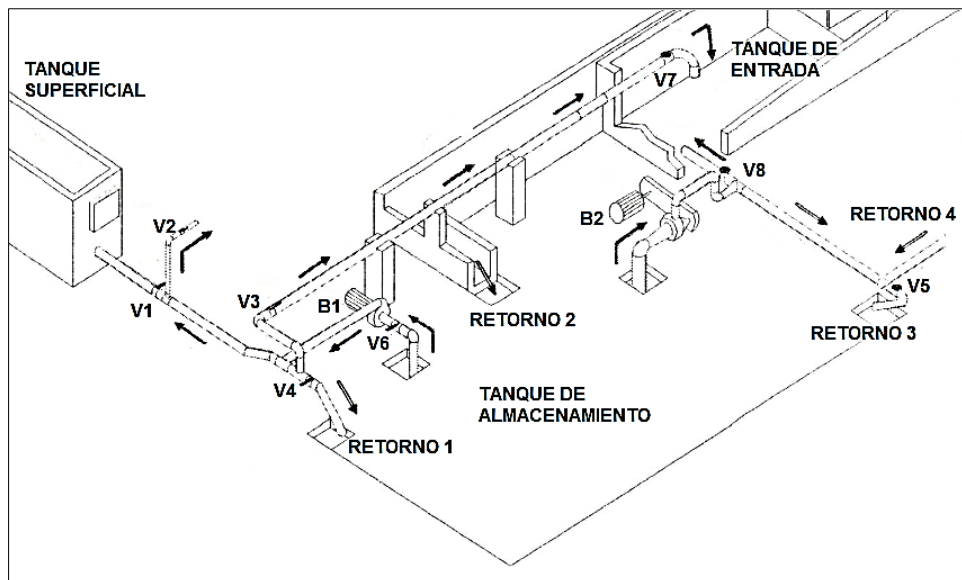


Figura 4-2. Sistema de bombeo UISA (Flórez Otero, 2008).

En la Figura 4-3, se presentan dos fotografías del sistema de bombeo desde dos ángulos diferentes. En la imagen de la izquierda puede observarse las tuberías de succión, descarga y retorno de la bomba B1, al igual que uno de los canales de retorno de flujo de agua hacia el tanque de almacenamiento, por su parte, en la imagen de la derecha, se presenta la línea de conducción hacia el tanque de entrada de la UISA, y las tuberías de succión y descarga de la bomba B2 (de color amarillo).



Figura 4-3. Fotografías del sistema de bombeo UISA.

Para este caso, y según lo evidenciado en las prácticas experimentales, la bomba B1 está en óptimas condiciones de operación, al igual que sus respectivas tuberías de succión y descarga. En cuanto a la tubería de conducción hacia el tanque de entrada, tiene una filtración de agua, y la válvula V3 está deteriorada y no permite cerrarse completamente.

Por su parte, la bomba B2 se encuentra en malas condiciones, presentando sobrecalentamiento del motor, ruidos extraños, oxidación del impulsor, una conexión eléctrica inadecuada y anclaje insuficiente. A pesar de que se le dedicó aproximadamente 2 meses en su recuperación, no fue posible conseguir que funcionase correctamente. La tubería de succión presenta óxidación considerable al igual que su válvula de pie, la tubería de descarga, por otro lado, se encuentra en buenas condiciones a excepción de la válvula V8 que no permite un cierre completo.

4.3 Tanque de entrada

Es una estructura prismática de fondo rectangular donde llegan las aguas provenientes de las bombas B1 y B2, y desde donde se distribuye hacia los canales de modelación, o para este caso, al modelo de la EERAC. Este tanque consta de dos muros de aquietamiento (de 24 cm de ancho y 1.0 m de alto) formado por bloques de mampostería intercalados, además de una malla en madera de 1.85 m de ancho por 1.0 m de alto, para reducir la turbulencia del flujo proveniente del sistema de bombeo.



Figura 4-4. Entrega de agua al tanque de entrada UISA.

La Figura 4-4 muestra la forma en que se descarga el agua proveniente de las bombas al tanque de almacenamiento donde, además, se observa sus condiciones y materiales. Luego de realizar múltiples ensayos en la instalación, se observó que el tanque presentaba un estado adecuado para el estudio, sin embargo, presenta filtraciones en su costado izquierdo, que finalmente escurren al canal de retorno, devuelta al tanque de almacenamiento, y por ende no representan un desperdicio representativo de agua.

4.4 Canales de modelación

Los canales de modelación de la UISA, originalmente y como fueron concebidos, son dos: uno de 1.5 m de ancho y 17 m de largo, y otro paralelo al anterior con un ancho de 0.3 m y 17 m de largo. El canal de menor ancho no se utilizó para el trabajo, y el canal de mayor tamaño fue aprovechado como soporte del modelo de la EEARC y para hacer uso de sus controles hidráulicos. Estos canales generalmente tienen la función de representar el fenómeno de transporte de sedimentos en canales naturales (Socavación y Agradación del lecho).



Figura 4-5. Canales de modelación UISA. Exclusor (izq.), compuertas basculantes (der.).

Los canales de modelación se encuentran en buen estado, aunque se evidenciaron pequeñas filtraciones. El exclusor de sedimentos de la instalación cuenta con una válvula de bola que está inutilizable por un atascamiento total en su mecanismo. Las compuertas basculantes están en buenas condiciones, pero no presentan un sellado completo en su parte inferior, permitiendo un pequeño paso de agua.

4.5 Robot de medición

Para la tesis de maestría de Flórez (2008), y con la ayuda de estudiantes y profesores de ingeniería mecatrónica de la Universidad Nacional, se diseñó y construyó un robot con sistema de posicionamiento XYZ capaz de realizar perfiles de fondo y medir con alta precisión y exactitud velocidades puntuales del flujo de agua. Este equipo no fue utilizado para el presente estudio, pero fue evaluada su integridad y funcionamiento. Se encontró que presenta fallas en su desplazamiento a lo largo del canal, pero su movimiento transversal es correcto. El acople del software y el robot está funcionando adecuadamente.

4.6 Canal de retorno

El canal de retorno recoge las aguas provenientes de la instalación UISA y las transporta de vuelta al tanque de almacenamiento. El canal tiene un ancho de 40 cm, una longitud de 30 m, y cuenta con una estructura de aforo tipo canaleta Parshall, la cual fue utilizada para medir el caudal de flujo por el sistema. A la izquierda de la Figura 4-6 se muestra una imagen del canal de retorno donde se observan algunas descargas puntuales directas de flujo, y a la derecha, la canaleta Parshall operando para un caudal elevado. Las mediciones de altura de lámina de agua se realizaron aguas arriba de la garganta de la canaleta con un limnómetro digital y en el mismo lugar donde Flórez (2008) determinó su curva de calibración.



Figura 4-6. Canal de retorno (izq.) y canaleta Parshall (der.) UISA.

Según Flórez, la canaleta Parshall fue calibrada siguiendo un método volumétrico confiable y obteniéndose así la relación se me muestra en la Figura 4-7. La ecuación de la curva de calibración es del tipo potencial con caudal medido en l/s y profundidad de lámina de agua en cm (ecuación (4.1)). En cuanto al estado e integridad del canal de retorno y canaleta Parshall, se notó que están en buen estado. El limnómetro digital requiere de unas reparaciones mínimas. La ecuación correspondiente es:

$$Q = 0.3794 h^{1.444} \quad (4.1)$$

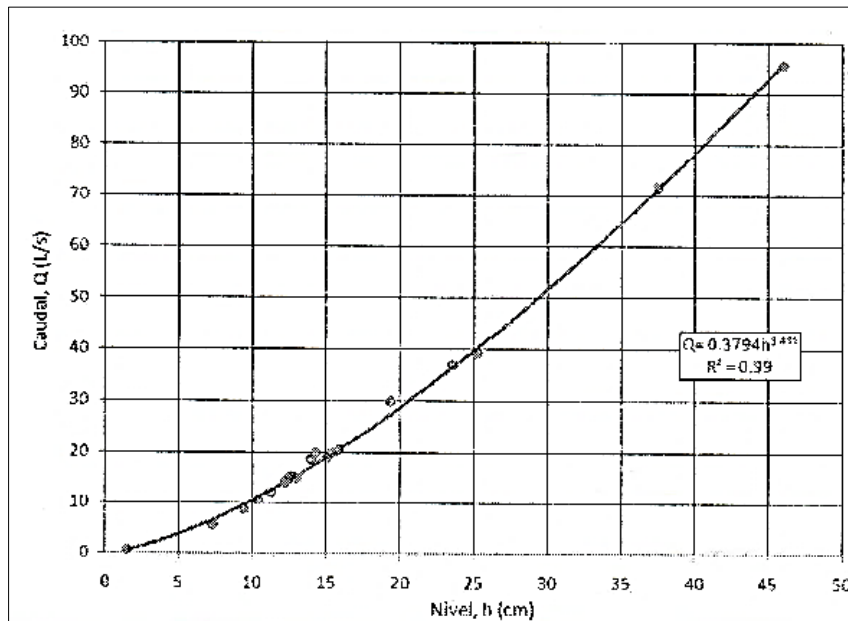


Figura 4-7. Curva de calibración de la canaleta Parshall (Flórez Otero, 2008).

5. Cambios al diseño de la EEARC

En esta sección se presentan las condiciones de diseño de la EEARC que se estudiaron en el presente trabajo y en las que se introdujeron cambios al diseño básico en cuanto a la geometría de los canales de conducción y repartición de flujo, pendientes de fondo, y a la proposición de un sistema de excluidores de sedimentos. Estas propuestas se establecieron teniendo en cuenta la optimización de las condiciones del campo de flujo, y considerando el espacio disponible de la Estación en el prototipo, la viabilidad de la construcción, y las facilidades de operación y mantenimiento del mismo, de donde resultaron las propuestas de mejora al diseño de la EEARC.

5.1 Cambios al diseño geométrico

5.1.1 Repartición del flujo en la entrada a la Estación

Con una pendiente del uno por mil y un coeficiente de rugosidad de Manning tan bajo como 0.013 en el ITC, valores tomados del diseño final de este conducto, el flujo de llegada a la Estación resulta de alta velocidad, con un número de Froude alrededor de 0.53 para todo el rango de caudales y que está muy cerca de la condición de flujo casi-crítico. Esta condición impone una fuerte restricción a la repartición equitativa del caudal en la expansión a la entrada de la Estación, y se le suma el cambio repentino de sección circular a rectangular, en solo 5 m, y además, la ampliación del ancho del conducto de 4.2 m a 15.5 m con dos muros divisorios de 1 m de ancho cada uno.

Dado que el conducto de llegada (ITC) es circular, se espera que haya un mayor caudal por unidad de ancho en la zona central del conducto, y un menor valor de este parámetro en cercanías a las paredes laterales (Figura 5-1). En estas condiciones, y con una distancia tan corta para realizar la expansión y repartición del flujo, parece lógico pensar que la mejor opción es lograr la repartición del flujo directamente a la salida del conducto, extendiendo los muros divisorios de las cámaras de cribado hacia la misma sección del ITC y dejar una

menor distancia en el centro para evitar que la mayor parte del flujo continúe hacia la cámara de cribado central. Como se muestra en la Figura 5-1, se escogió de forma relativamente arbitraria, una separación de canales de repartición de 1.35 m en los laterales y de 1.00 m en el centro. Los dos muros laterales se angostan al máximo, considerando un ancho bajo de 25 cm y con un perfil liso en la punta, (posiblemente acero inoxidable en el prototipo), para disminuir los efectos de separación del flujo y de vorticidad resultante en el impacto con los muros.

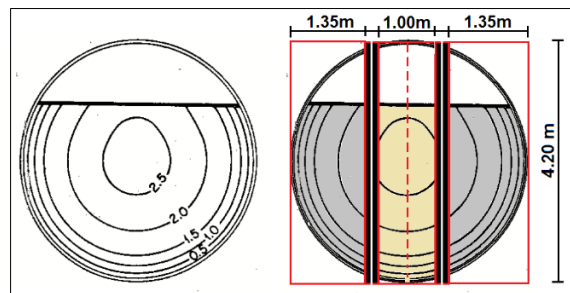


Figura 5-1. Variación de velocidad de flujo en una tubería circular (izq.) y propuesta de división de flujo de entrada (der.).

Estos cambios se realizaron juzgando las dificultades obtenidas en la modelación matemática realizada durante las primeras fases del diseño de la Estación, con las pantallas deflectoras sugeridas en el diseño básico. La solución por extensión de los muros divisorios de las cámaras de cribado es original de los presentes investigadores, pero tiene antecedentes en artículos técnicos sobre la mejor distribución del flujo en transiciones, como la referencia de Austin (1970), y una de las recomendaciones generales de la norma ANSI 9.8. (2018) (imágenes izquierda y derecha respectivamente en la Figura 5-2).

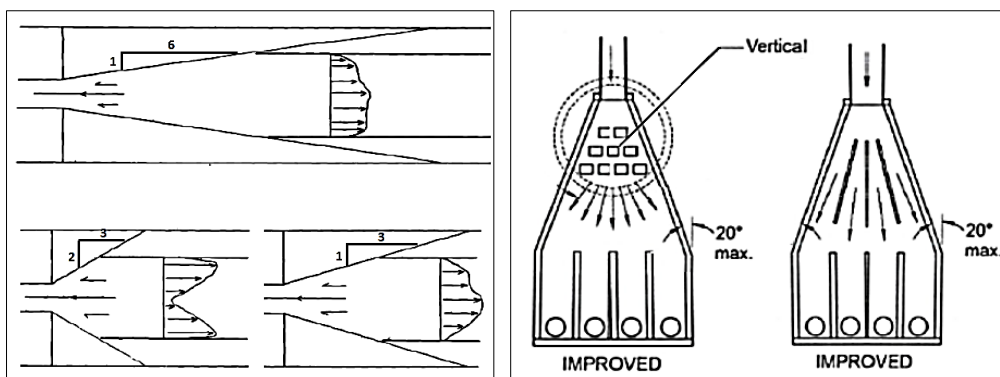


Figura 5-2. Diferentes formas consideradas para distribuir el flujo en el pozo de cribado.

5.1.2 Geometría de la expansión en la zona de cribado

A diferencia del brusco ángulo de expansión y contracción que se consideran en los diseños básicos y preliminares (línea fucsia Figura 5-3), y que no permite una variación controlada y gradual de velocidad, para la zona de cribado se proponen ángulos más convenientes para desarrollar el flujo sin formación de vorticidad considerable. Como se presenta en la Figura 5-3 y Figura 5-4 que muestran la planta y perfil de la primera parte de la EEARC, el pozo de cribado, con un diámetro de 20 m, contiene en su interior la zona de entrada de las aguas provenientes del ITC y los canales de cribado, donde además se señalan siete zonas de especial importancia a mencionar con sus propuestas de cambio de geometría.

Como se observa, para lograr una mejor distribución del flujo en cada cámara de cribado y mejorar el ángulo de expansión en cada una de las tres conexiones creadas al extender los muros, se prefirió disminuir el ancho de cada cámara de 4.50 m a 3.50 m, y verificar en el modelo el efecto de esas modificaciones en la distribución de caudal y velocidad en cada canal. De esta manera, reduciendo el ancho de los canales de cribado, se mejoraban las condiciones hidráulicas de expansión y contracción del flujo en la Estación. Se resalta que en perfil no se realizaron cambios de geometría, y se mantuvieron las propuestas originales de rampas de entrada y zonas de acumulación de sedimentos como se describe a continuación.

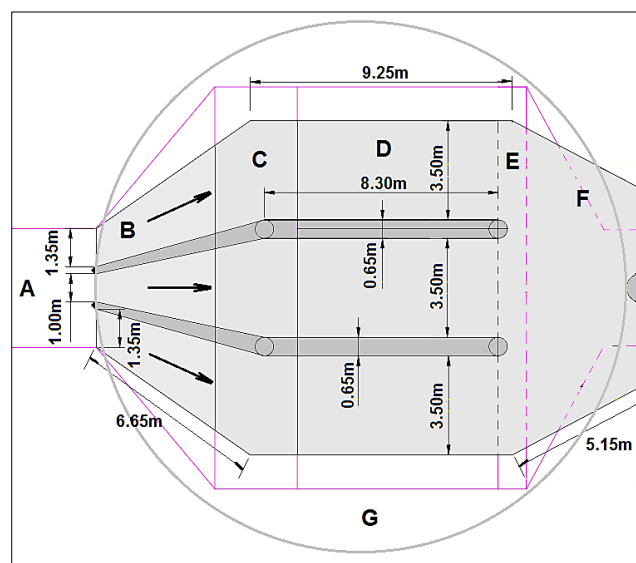


Figura 5-3. Planta de la geometría del pozo de cribado usada en el modelo.

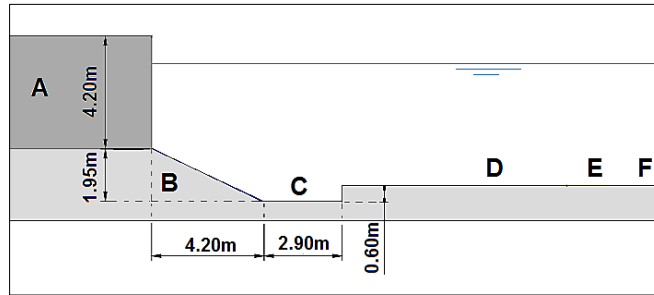


Figura 5-4. Perfil de la geometría del pozo de cribado utilizada en el modelo

- Zona A:** Final del Interceptor Tunjuelo – Canoas (ITC) y entrega de las aguas a la Estación EEARC. Como se muestra en la Figura 5-1, se propone que el flujo sea dividido en tres partes y busque un reparto equitativo de caudal en las tres cámaras de cribado desde la entrada a la Estación.
- Zona B:** Como se presenta en las Figura 5-3, Figura 5-4 y Figura 5-5, la Zona B contiene la transición de entrada de las aguas residuales a la Estación, la cual se diseñó con una expansión en planta y una expansión en perfil para cada uno de los tres canales divergentes. Para los canales laterales en este sector, la expansión en planta es asimétrica y está conformada por un cambio de dirección exterior de 35.0° y un cambio de dirección interior de 15.5° , el canal central por su parte, presenta una expansión simétrica con un ángulo de 12.0° . El ángulo de contracción luego del paso del agua por las cámaras de cribado tiene un valor de 28° . En perfil, la rampa de esta zona tiene un ángulo de 25.0° aproximadamente.

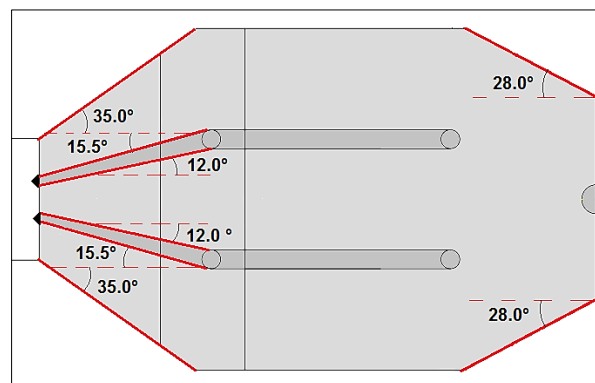


Figura 5-5. Ángulos de expansión y contracción del pozo de cribado en el modelo

- **Zona C:** Al final de la rampa de entrada se llega (en perfil) a un nivel un poco más bajo que el de los canales de cribado. Este espacio es destinado en el diseño básico como zona de depósito de materiales gruesos, o foso de depositación, donde se planea usar una cuchara bivalva para removerlos mecánicamente. En la propuesta de diseño con muros extendidos, y como se comenta más adelante, a cada canal divergente le corresponde una porción de esa zona de depósito de material, el cual se propone remover con la primera fase de excluidores de sedimentos tipo alcantarilla en la pared vertical frontal del foso.
- **Zonas D y E:** Hacen referencia al espacio destinado a los canales de cribado. Estos canales se proponen de 3.50 m de ancho y muros de 65 cm de espesor para, como se comentó, permitir una mejora en los ángulos de entrada y salida del flujo de la zona de cribado. Al final de los canales se ubica la reja de cribado para controlar el paso de material flotante y partículas gruesas mayores a 6 cm de espesor.
- **Zona F:** Luego de que el flujo supera la fase de cribado, se requiere contraer de nuevo la sección dado que el diseño estructural de los dos pozos requiere de un ancho de canales de conexión tan pequeño como sea posible. Gracias a la reducción del ancho de las cámaras de cribado y al considerar los canales de conexión de 3 m cada uno (en el diseño básico eran de 1.50 m) el ángulo resultante para la contracción es de 28.0° , valor que se acerca considerablemente al valor de 27.5° recomendado en la literatura. Se resalta que el diseño detallado de la Estación también decidió por canales de 3.0 m de ancho para disminuir velocidades y mejorar la ampliación subsiguiente en la entrada a los cárcamos de bombeo.

Los investigadores del presente trabajo tuvieron ocasión de comparar su diseño de muros separadores con ancho variable, al encontrar en Internet la descripción de la llamada “Duncrue St. Inlet”, una obra de repartición del sistema de tratamiento primario para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Belfast, Irlanda del Norte, que cuenta con una estructura muy similar a la zona de cribado a la entrada de la EEARC. La Figura 5-6 presenta una vista general de esta estructura hidráulica la cual fue recientemente optimizada para reducir la frecuencia en el mantenimiento de los equipos de tratamiento y la mano de obra (Huber Technology, 2015).



Figura 5-6. Duncrue Street Inlet Works, Belfast PTAR. (Huber Technology, 2015)

Haciendo una revisión rápida de las imágenes satelitales en Google Earth de la estructura, fue posible obtener algunas dimensiones de la Estación, como se muestra en la Figura 5-7. Se nota que, en general, el flujo de agua residual que inicialmente fluye por un canal de aproximadamente 6 m de ancho, se expande casi cuatro veces para ser dividido en seis canales de conducción. Se observa un ángulo de expansión de alrededor de 20° para reducir la posible separación de flujo en esta transición. De igual manera, se resalta un diseño siguiendo la filosofía de reducir al máximo los cambios bruscos en la expansión y disminuir el espesor de los muros en el punto de impacto del flujo de entrada.

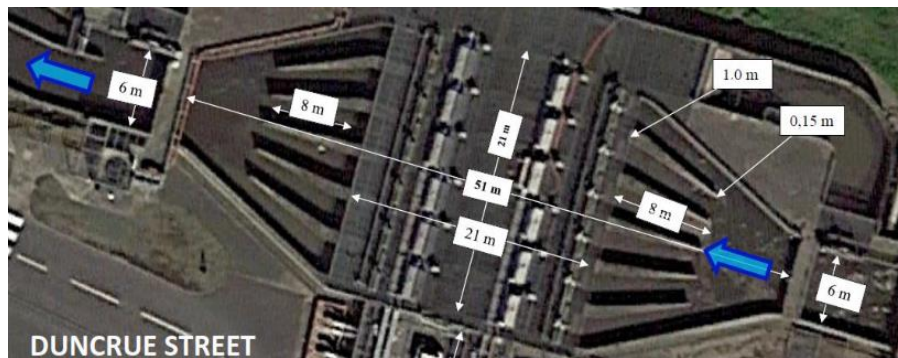


Figura 5-7. Vista en planta de la estructura, Duncrue St. Inlet, medidas con Google Earth

La Figura 5-7 muestra que el flujo de agua luego de expandirse y reducir su velocidad, ingresa a una serie de canales delimitados con muros deflectores que, a través de una distancia de aproximadamente 8 m, canalizan e independizan las aguas para ser tratadas en la zona central de la estructura. Como se puede observar, los muros deflectores son en

sus extremos muy angostos terminando en punta, en procura de evitar separaciones de flujo y turbulencia adicional no deseada al interior de los canales (Figura 5-8).



Figura 5-8. Vista frontal estructura y muros deflectores. (Huber Technology, 2015)

Como se observa en la imagen, luego del tratamiento y procesos realizados en la zona central, de forma gradual el flujo es nuevamente acelerado en seis canales de conducción y combinado hasta un ancho igual al que ingresó a la estructura, es decir 6 m en un ángulo de contracción de alrededor de 25° . Las ventajas hidráulicas que traen la utilización de este tipo de estructuras para expansión y repartición de caudales, son en primera medida lograr la equitativa distribución del flujo permitiendo la reducción gradual de la velocidad en la expansión, sin introducir turbulencia adicional en el flujo, como ocurriría en el caso de los bloques de impacto.

5.1.3 Geometría de canales de conexión y cárcamos de bombeo

Para la sección comprendida entre los canales de conexión y los cárcamos de bombeo se tomó esencialmente el mismo tipo de expansión en planta adoptado en el diseño detallado en progreso, que ya representa un cambio sobre el diseño básico, donde la expansión era más brusca, particularmente porque el fondo de los canales de conexión hasta el inicio de los cárcamos era horizontal, al mismo nivel de las cámaras de cribado.

En el diseño del presente trabajo, se optó por un cambio fuerte en el perfil, dándole una pendiente uniforme desde el inicio de los canales de conexión, hasta el fondo de los cárcamos de bombeo. Esta modificación fue posteriormente adoptada en el diseño detallado de la Estación, pero solo en forma parcial, llegando a un nivel por encima del

conducto de succión de la primera bomba, es decir a más de 1,50m del fondo del cárcamo de bombeo.

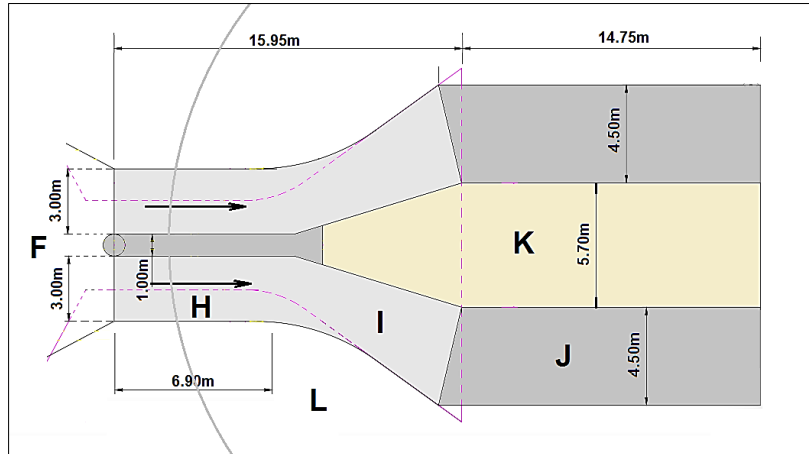


Figura 5-9. Planta de la propuesta de geometría de la EEARC en el pozo de bombeo.

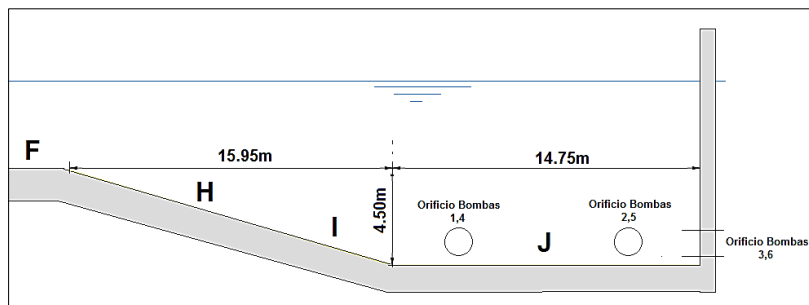


Figura 5-10. Perfil de la propuesta de geometría de la EEARC en el pozo de bombeo.

Como se muestra en la Figura 5-9, el pozo de bombeo según el diseño básico, contiene los canales de conexión, los cárcamos de bombeo y la zona de vertido central para excedentes que continúan por el resto del ITC (considerado como conducto de emergencia) para disposición de caudales de excesos hacia el río Bogotá. A continuación, se detallan otras 5 zonas relevantes a tener en cuenta, junto a sus propuestas de cambio de geometría:

- **Zona H:** Como se comentó anteriormente, se proponen canales de conexión de 3m de ancho para disminuir la velocidad de entrada a los cárcamos de bombeo y propiciar un ángulo de contracción recomendable en la zona de cribado. Como se

muestra en la Figura 5-3 o en la Figura 5-9, esto implica una intervención mayor a la estructura, tanto del pozo de cribado como del pozo de bombeo. Esto se consideró necesario, ya que si se tomaba un ancho de canales de 1.5 m como en el diseño básico, (línea fucsia Figura 5-9), las velocidades de flujo serían más elevadas, nuevamente habría una expansión muy corta con un ángulo desfavorable y se presentaría turbulencia excesiva en los cárcamos de bombeo.

Aun cuando el diseño básico no explica realmente la necesidad de esas dimensiones, ni explica el criterio de diseño que las genera, el razonamiento de los investigadores de este trabajo de grado, conduce al reducir gradualmente la velocidad del flujo de entrada a la Estación para llegar a los cárcamos de bombeo con una velocidad mínima, de acuerdo con las condiciones de operación. Por esta misma razón, se cambió el diseño del perfil de los canales, que era horizontal en el diseño básico, a un fondo inclinado, desde el final de la contracción de salida de las cámaras de cribado, hasta el inicio de los cárcamos de bombeo. La pendiente de estos canales llega así a 15.8° y garantiza el aumento progresivo de profundidad y por consiguiente la reducción gradual de velocidad.

- **Zona I:** Al terminar los canales de conexión, estos divergen hasta alcanzar el ancho requerido de los cárcamos de bombeo. Esto propicia, junto al aumento de la profundidad del flujo, una disminución adicional de velocidad por el aumento del ancho de los canales.
- **Zona J:** Hace referencia a los cárcamos de bombeo de la Estación. Se proponen prismáticos con sección rectangular para maximizar la capacidad de reducción de velocidad de flujo y turbulencia, y así disminuir la posibilidad de que se presenten efectos negativos para el bombeo (por ejemplo, la prerrotación en las tuberías de succión). Siempre con el propósito de generar una transición suave de sección, que permitiese una reducción gradual de la velocidad del agua y disminución de la vorticidad en los cárcamos de bombeo, se eliminaron las trincheras inferiores de estos canales (Figuras 1-4 y 5-11), aparentemente diseñadas para concentrar los sedimentos hacia las bombas, y se dejaron los cárcamos rectangulares y uniformes con 4.5 m de ancho en toda su profundidad.

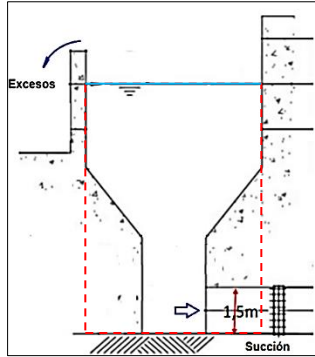


Figura 5-11. Cambio de sección de los cárcamos de bombeo en el modelo.

- Zona K:** Como se comentará en la sección siguiente, hace referencia a la zona interior del vertedero de excesos de la Estación, que en el presente trabajo se propone como zona de depósito del material granular proveniente de los excluidores de sedimentos, que se incluyen a fin de minimizar la entrada de material grueso a las bombas. En el diseño básico este espacio se deja de lado como innecesario, y de hecho se propone rellenarlo con concreto.

5.2 Propuesta de sistema de exclusión de sedimentos

Dado que el interés especial del presente trabajo es el de estudiar una forma efectiva de eliminar o por lo menos minimizar la entrada de sedimentos gruesos a las bombas de la Estación Elevadora, a fin de mejorar sustancialmente los costos de mantenimiento de las mismas, se describe en esta sección el sistema propuesto. Se proponen dos etapas de extracción de sedimentos: una inicial que consiste en utilizar excluidores frontales tipo alcantarilla en el foso de la cuchara bivalva, que en el presente caso se redujeron a tres tubos circulares de 14 pulgadas en el prototipo (1 pulgada en el modelo), pero que podrían en un diseño posterior reemplazarse por sumideros verticales; y una segunda etapa, que utiliza dos excluidores a 45° del mismo diámetro ubicado en los dos canales de conexión y que derivarían el material de arrastre que llegue a esos canales.

A la izquierda de la Figura 5-12 se muestra el detalle para este tipo de excluidores los cuales tienen, a lo ancho de la sección transversal del desnivel, media tubería semicircular para fomentar remolinos y el ingreso del material granular al excluidor. Por su parte, a la derecha de la imagen, los excluidores de sedimentos a 45° son superficiales y descargan también

en la zona de acumulación de sedimentos. A diferencia del tipo alcantarilla, estos últimos tienen la ventaja de recoger los sedimentos de arrastre de toda la sección. La Figura 5-12 muestra el detalle de este tipo de exclusores, los cuales, como se puede notar, son circulares enterrados una distancia equivalente a $D/2$.

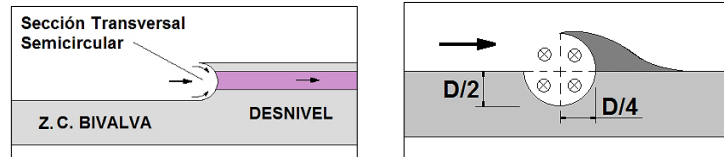


Figura 5-12. Detalle geométrico entrada exclusores tipo frontal (izq.) y a 45° (der.).

Para evitar al máximo atascamientos, se plantean tuberías independientes para cada uno de los exclusores del sistema. Aquellos de tipo alcantarilla se localizan en el punto medio del desnivel al inicio de los canales de cribado y descargan al inicio de la zona de sedimentos ubicada entre los dos cárcamos de bombeo (Figura 5-13). Como se observa en el esquema, estas tuberías deberían ser instaladas por debajo del fondo de la Estación y seguirían sus cambios de pendiente.

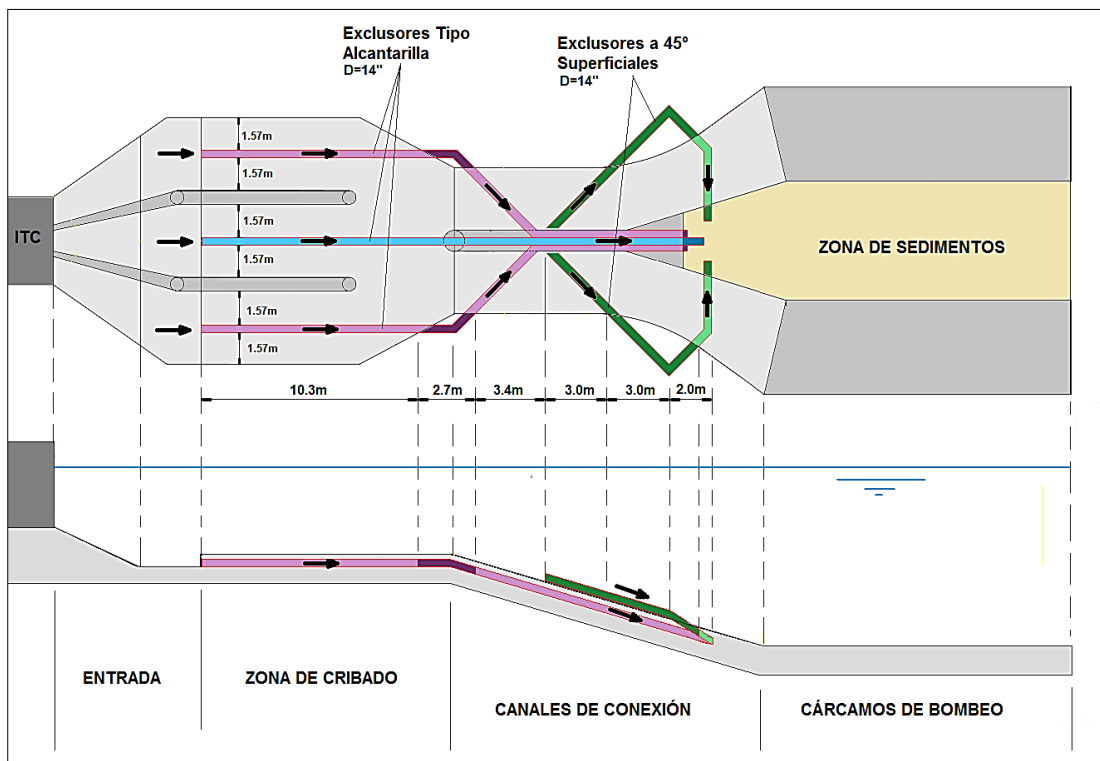


Figura 5-13. Propuesta de sistema de exclusión de sedimentos EEARC (Planta y Perfil).

6. Escalas de modelación

Para definir las escalas de modelación tanto hidráulica como sedimentológica, fue necesario considerar los siguientes aspectos:

- 1. Espacio disponible en el canal de la instalación UISA:** La UISA cuenta con un canal de 1.5 m de ancho y 17 m de largo, y junto a este uno más pequeño de 30cm de ancho y 17 m de largo.
- 2. Disponibilidad de materiales de construcción:** Se utilizaron materiales reciclados como paneles de Dry Wall, tubería de acero galvanizado, tubería PVC, y se buscó reducir la necesidad de compra de materiales como ladrillos, cemento y arena. En general se contó con 5 paneles de 2.40 m x 1.20 m, es decir 14.4 m² de láminas para construir cada uno de los componentes del modelo. En cuanto a las tuberías, la UNAL cuenta con tramos hasta de 12 pulgadas.
- 3. Capacidad de bombeo de la instalación:** Como se mencionó anteriormente, la UISA está diseñada para operar con la impulsión simultánea de 2 bombas centrífugas. Sin embargo, aquella con capacidad de 100 l/s no fue posible repararla, por lo que se contó únicamente con la bomba de capacidad máxima de 55 l/s.
- 4. Disponibilidad de tiempo de experimentación:** Dada las condiciones de pandemia por Covid-19, los tiempos de ingreso al laboratorio se restringieron. Por este motivo, fue necesario programar los ensayos para que pudiesen iniciar y finalizar en jornadas continuas de 4 horas.
- 5. Comportamiento hidráulico esperado:** Se espera que el comportamiento del flujo en la EEARC sea turbulento y rápidamente variado, donde se experimentan cambios de sección transversal y de dirección repentinas en distancias cortas. Por este motivo, los efectos turbulentos pueden llegar a ser dominantes y la fricción en

primera medida despreciable. El modelo además no puede tener distorsión geométrica de modo que $L_r = h_r$, donde L y h son dimensiones características de longitud y altura.

6.1 Escalas de modelación hidráulica

En primer lugar, se considera un modelo Froude como representativo para dar cumplimiento con la similitud dinámica, ya que el movimiento del fluido es gobernado por la acción de la gravedad y el efecto de la viscosidad no es dominante en su comportamiento. Por esto, se requiere que:

$$F_{R_r} = \frac{U_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad (6.1)$$

Donde F_{R_r} es la escala de números de Froude que para dar cumplimiento a la similitud dinámica debe ser 1, U_r es la escala de velocidad, g_r es la escala de gravedad y L_r es la escala geométrica. Como $g_r = 1$, se obtiene que:

$$U_r = \sqrt{L_r} \quad (6.2)$$

Las escalas de área, volumen, tiempo y caudal, en función de la escala geométrica:

$$\begin{aligned} A_r &= L_r^2 & V_r &= L_r^3 \\ t_r &= \frac{L_r}{U_r} = \sqrt{L_r} & Q_r &= U_r A_r = L_r^{5/2} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Donde A_r, V_r, t_r y Q_r , son las escalas de área, volumen, tiempo y caudal respectivamente expresadas en términos de L_r .

Teniendo en cuenta la tubería disponible para uso en el laboratorio, la cual es de 12 pulgadas y sabiendo que esta representará el ITC con diámetro de 4.2 m en el prototipo, la escala L_r y Q_r serían:

$$L_r = \frac{4.2m}{0.3048m} = 13.78 \qquad Q_r = 13.78^{5/2} = 704.89$$

De esta forma, el caudal máximo de modelación resultaría de 51.3 l/s, el cual puede ser suplido por la bomba en funcionamiento de la UISA.

$$Q_m = \frac{36.2 \text{ m}^3/\text{s}}{704.89} = 0.0513 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 51.3 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Según esto, las escalas de velocidad, tiempo, área y volumen serían:

$$\begin{aligned} U_r &= 3.71 & t_r &= 3.71 \\ A_r &= 189.9 & V_r &= 2616.7 \end{aligned}$$

6.2 Escalas de modelación sedimentológica

Como se mencionó en la sección de Marco Conceptual, para casos de estudio en los que no se presente equilibrio sedimentológico y donde se espere una tendencia a la depositación, (como es el caso de la EEARC), es necesario, además de considerar los parámetros de intensidad del flujo y del transporte sólido, que determinan la tasa de transporte por arrastre, (ecuación (2.3)), y el parámetro de movilidad de Rouse para la suspensión, (ecuación (2.4)), tener en cuenta un parámetro adicional que esté en sincronía con la ecuación (2.5) y que describa la depositación en un campo de flujo en estado de desequilibrio sedimentológico.

Como se comentó, las condiciones de arrastre y suspensión dependen de la relación entre la velocidad de sedimentación U_s y la velocidad de corte U_* . Luego, se debe garantizar en primera medida que para modelo y prototipo se cumpla esta relación y por tanto la escala de velocidad U_r sea igual a la escala de velocidad de corte U_{*r} :

$$U_r = U_{*r} = \sqrt{L_r} \qquad (6.4)$$

Considerando la ecuación general de depositación, en caso de flujo transicional, se hace necesario, además de garantizar la ecuación (6.4), que en el prototipo y modelo se cumpla:

$$\frac{U_{sr} t_r}{H_r} = \frac{U_{sr}}{U_r} = 1 \quad (6.5)$$

Las escalas de tiempo de sedimentación t_{sr} y de longitud de sedimentación L_{sr} en función de las escalas de velocidad de sedimentación y de la velocidad de flujo respectivamente deben satisfacer que:

$$t_{sr} = \frac{H_r}{U_{sr}} \quad L_{sr} = U_r t_{sr} \quad (6.6)$$

De la relación (6.5) se nota que las escalas de velocidad de sedimentación y de velocidad de flujo deben ser iguales, y por tanto, junto a la ecuación (6.6) debe cumplirse que:

$$L_{sr} = H_r = L_r = 13.78 \quad U_r = U_{*r} = U_{sr} = \sqrt{L_r} = 3.71 \quad (6.7)$$

De esta forma, para que exista similitud en el proceso de depositación, en todo el rango de condiciones hidrodinámicas, debe satisfacerse las relaciones (6.7), y cumplir que la escala de longitud en la sedimentación sea la misma escala geométrica L_r . El desarrollo de estas escalas y la importancia de la longitud de sedimentación en el análisis se pueden encontrar en Ordoñez (2010).

La escala de tiempo sedimentológico generalmente es diferente a la escala de tiempo hidráulico y varía en función de la carga de sedimentos o caudal sólido que ingresa al modelo. Esta escala se calcula como la relación de tiempos de llenado de material granular de volúmenes homólogos en el modelo y prototipo. Se estima un volumen de llenado de sedimentos en la Zona C del prototipo (Figura 5-3 y Figura 5-4) destinado a la cuchara bivalva, de 30 m^3 en el prototipo, lo cual a escala del modelo equivalen a:

$$V_m = \frac{V_p}{V_r} = \frac{30 \text{ m}^3}{2616.7} = 0.0115 \text{ m}^3 = 11.5 \text{ litros}$$

La carga de material granular en el prototipo, en condiciones de operación normal, es decir para clima o tiempo húmedo promedio, y bajo un caudal medio en la Estación de alrededor

de 16 m³/s, es de 20 m³/día. Según estas condiciones, el tiempo de llenado de este volumen en el prototipo sería de:

$$t_{sp} = \frac{V_{sp}}{Q_{sp}} = \frac{30 \text{ m}^3}{20 \text{ m}^3/\text{día}} = 1.5 \text{ días}$$

Debido a las condiciones restrictivas de ingreso al laboratorio de la UNAL por las condiciones de pandemia por Covid-19, se disponía de un tiempo de permanencia en el laboratorio de máximo 4 horas, por lo que los ensayos experimentales deberían ser más cortos, pero sin dejar de representar adecuadamente la respuesta hidráulica y sedimentológica de la Estación. Se buscó entonces, un abastecimiento de sedimentos en el modelo que generara, para condiciones normales, un llenado completo del volumen homólogo en un tiempo tal, que diera la oportunidad de extender el ensayo para visualizar otros fenómenos.

Considerando un abastecimiento que generase un llenado del volumen homólogo en 1.5 horas y un tiempo de experimentación de 3 horas, su magnitud en el modelo sería de:

$$Q_{sm} = \frac{V_m}{t_{sm}} = \frac{11.5 \text{ litros}}{1.5 \text{ horas}} = 7.7 \frac{\text{litros}}{\text{hora}}$$

Y por tanto la escala de tiempo sedimentológica tendría un valor de 24, lo que implica que 1 hora en el modelo representaría 24 horas en el prototipo.

$$t_{sr} = \frac{t_{sp}}{t_{sm}} = \frac{36 \text{ horas}}{1.5 \text{ horas}} = 24$$

Esta carga de sedimentos resultó ser muy baja y difícil de obtener. El menor valor de abastecimiento alcanzado, utilizando un equipo simple de entrega de sedimentos al modelo resultó en promedio de 12 l/hora (18 kg/hora), representando un tiempo de llenado, y una escala de tiempo sedimentológica en condiciones de clima húmedo normal de:

$$t_{sm} = \frac{V_{sm}}{Q_{sm}} = \frac{11.5 \text{ litros}}{12 \text{ litros/hora}} = 0.96 \text{ horas} \qquad t_{sr} = \frac{t_{sp}}{t_{sm}} = \frac{36 \text{ horas}}{0.96 \text{ horas}} = 37.5$$

Esto quiere decir que una hora de ensayo en el modelo corresponde a más de 1.5 días de operación en el prototipo. De igual manera, para representar condiciones en el prototipo de clima o tiempo húmedo normal máximo con valor aproximado de 284 m³/día, se utilizó un dosificador de sedimentos que entregara una carga al modelo de en promedio 25.3 l/hora (38 kg/h). Para este caso, se tendrá un tiempo de llenado en el prototipo, tiempo de llenado en el modelo y escala de tiempo sedimentológico de:

$$t_{sp} = \frac{V_{sp}}{Q_{sp}} = \frac{30m^3}{284 m^3/día} = 0.11 \text{ días}$$

$$t_{sm} = \frac{V_{sm}}{Q_{sm}} = \frac{11.5 \text{ litros}}{25.3 \text{ litros/hora}} = 0.45 \text{ horas}$$

$$t_{sr} = \frac{t_{sp}}{t_{sm}} = \frac{2.54 \text{ horas}}{0.45 \text{ horas}} = 5.6$$

Esto quiere decir que una hora de funcionamiento del modelo equivale a 5,6 horas de operación de la Estación. Más o menos la cuarta parte de un día de operación. Los valores de la carga sedimentológica promedio y la carga sedimentológica máxima del ITC fueron tomados de los cálculos realizados por el diseñador final de la Estación.

7. Definición del material granular

Según la revisión realizada por Camacho y Ordoñez (2020) de los estudios internacionales realizados en cuanto a sedimentos presentes en alcantarillados, se notó que, a pesar de presentar material en suspensión, un gran porcentaje corresponde a material grueso. Esto se hace más notorio cuando el alcantarillado es combinado y las cuencas de drenaje sanitario y de aguas lluvia incluyen zonas de actividades económicas relacionadas con el manejo de materiales granulares (por ejemplo, la construcción).

Las mediciones de sedimentos hechas en diferentes sistemas de alcantarillados, además de las investigaciones realizadas en países de Europa y Asia, muestran que los colectores combinados transportan sedimentos de arrastre superiores a 1 mm y hasta de 5 cm. Por este análisis, se ha utilizado una distribución granulométrica como la de la Figura 7-1, sugerida por Ordoñez dentro del proceso de diseño detallado de la EEARC. De acuerdo con esta granulometría, se definió para el modelo una gradación que permitió representar de la mejor manera las condiciones de transporte y deposición de sedimentos utilizando materiales de arena y grava de fácil consecución en el mercado (explicado en la Tabla 7-1).

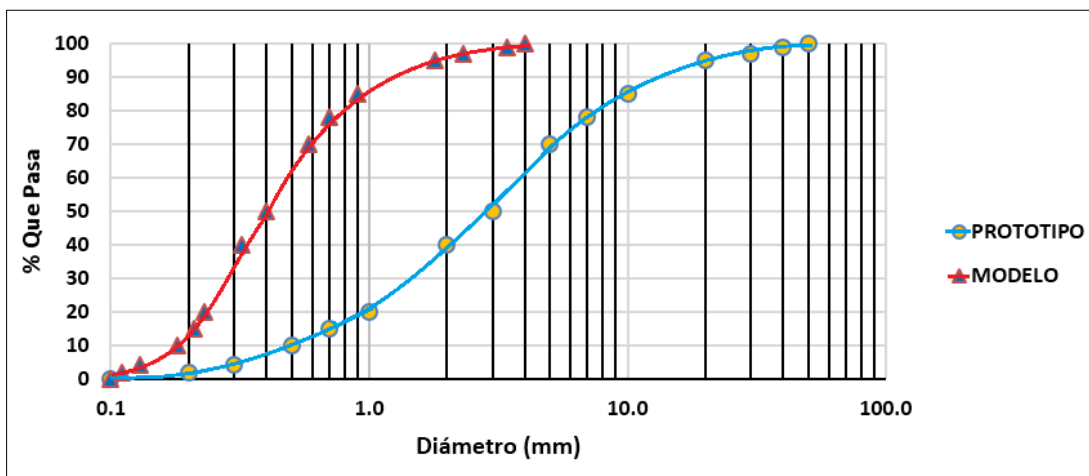


Figura 7-1. Distribución granulométrica esperada en el prototipo y modelo.

La Tabla 7-1 muestra la estimación de la granulometría para el modelo: en las columnas 2, 3, 4 se presenta respectivamente el diámetro de la partícula, el cálculo de la velocidad de asentamiento y la longitud de sedimentación del prototipo, mientras que en las columnas 5, 6 y 7 se presentan los mismos parámetros y cálculos para una granulometría de arena supuesta en el modelo; finalmente, en las columnas 8, 9 y 10 se calculan las escalas sedimentológicas resultantes, de donde se deduce que la escala de diámetro se ha relajado sobre la escala de longitud, particularmente en el caso de los materiales más finos, para satisfacer las condiciones de transporte y depositación, que son más representativas para el objetivo de la modelación.

Tabla 7-1. Estimación de granulometría para sedimentos del modelo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% Pasa	Dp (mm)	Vsp (m/s)	Lsp (m)	D _m ARENA (mm)	Vsm ARENA (m/s)	Lsm ARENA (m)	Vsr	Lsr	Dr
10	0.5	0.070	114.5	0.17	0.019	8.31	3.71	13.78	2.89
20	1.0	0.118	67.8	0.24	0.032	4.92	3.71	13.78	4.13
40	2.0	0.178	45.0	0.34	0.048	3.26	3.71	13.78	5.97
50	3.0	0.221	36.2	0.41	0.060	2.63	3.71	13.78	7.30
60	4.0	0.257	31.1	0.48	0.069	2.26	3.71	13.78	8.27
70	5.0	0.289	27.7	0.55	0.078	2.01	3.71	13.78	9.04
85	10.0	0.411	19.5	0.90	0.111	1.41	3.71	13.78	11.17
95	20.0	0.582	13.8	1.59	0.157	1.00	3.71	13.78	12.58
97	30.0	0.713	11.2	2.29	0.192	0.82	3.71	13.78	13.10
99	40.0	0.823	9.7	3.01	0.222	0.71	3.71	13.78	13.29
100	50.0	0.921	8.7	3.73	0.248	0.63	3.71	13.78	13.40

Para representar los sedimentos requeridos para el modelo, se contaba en el laboratorio con cuatro clases diferentes de materiales granulares para ser combinados (Figura 7-2). El material #1 proviene de la tesis de Flórez en el 2008, de la cual quedó alrededor de 1 tonelada de arena fina para ser utilizada. Este material se encontraba en condiciones inadecuadas, por el desconocimiento de su granulometría, y la presencia de materiales extraños. Se realizó un tamizado general, y se le fue retirado todo el material indeseable. En cuanto al material #2, se consiguió alrededor de 50 kg de arena gruesa en tamaños relativamente uniformes. El material #3 consistió en alrededor de 300 kg de grava fina, de

igual manera, bastante uniforme, mientras que del material #4 fue posible acceder a aproximadamente 50 kg de un material triturado bien gradado.

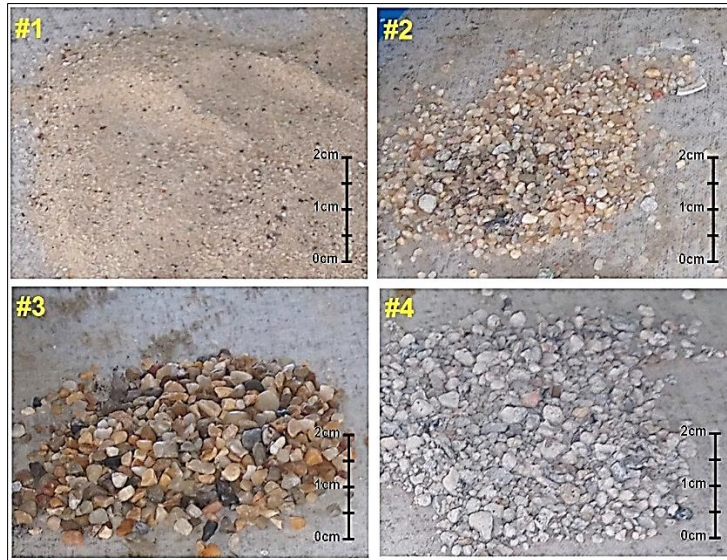


Figura 7-2. Materiales utilizados para representar los sedimentos del modelo.

La Figura 7-3 presenta las granulometrías encontradas para cada uno de estos materiales disponibles, de los que se observa que el material 1 y 4 son bien gradados, y los materiales 2 y 3 presentan tamaños bastante uniformes.

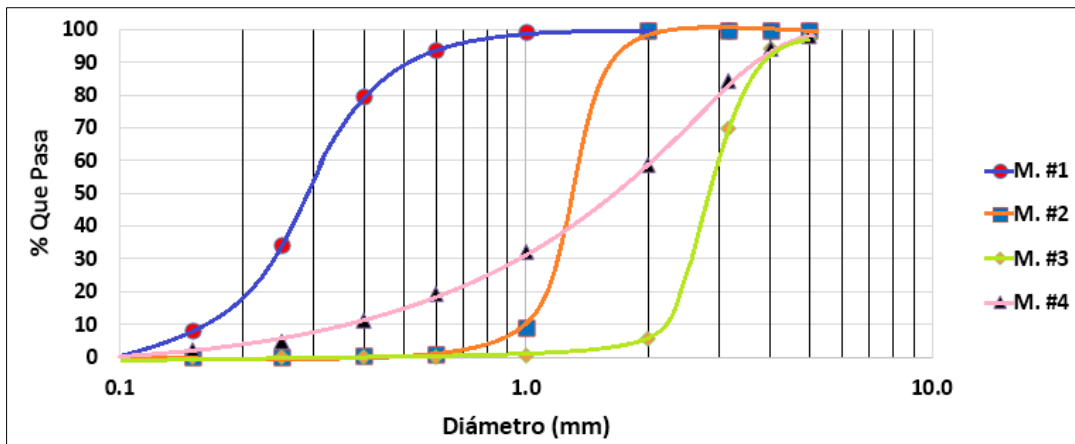


Figura 7-3. Granulometría de los 4 materiales disponibles.

Para encontrar la gradación más conveniente y aproximada a la curva definida para el modelo, se probaron varias combinaciones de granulometrías y se les evaluó el error

promedio y su correlación con la gradación buscada. Adicional a esto, se le dio una importancia adicional a utilizar una mayor proporción de arena fina, ya que ésta se encontraba con mayor abundancia en el laboratorio, lo que permitía realizar una mayor cantidad de ensayos experimentales si fuese necesario.

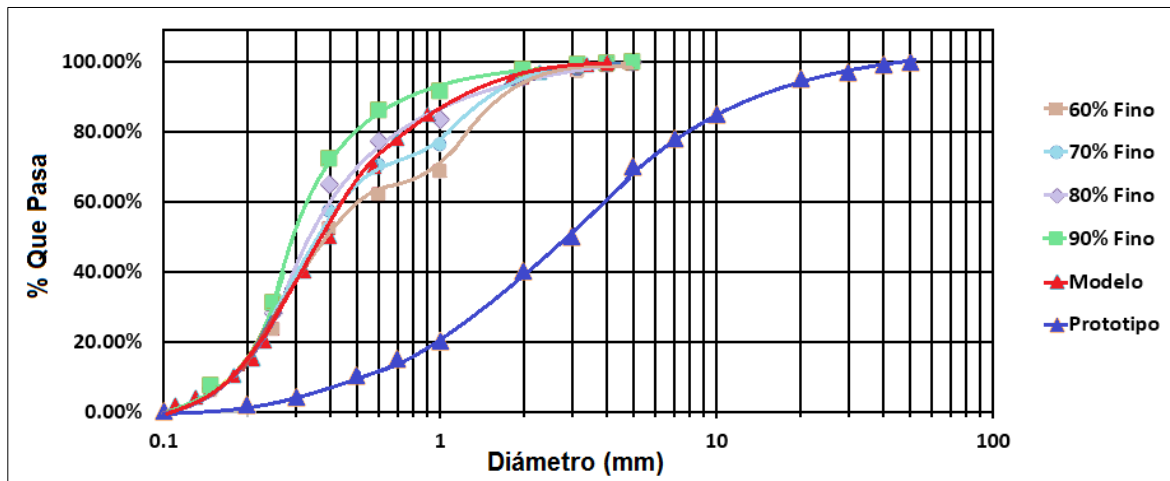


Figura 7-4. Pruebas de combinación de granulometrías con arena fina (M#1) como material predominante.

La Figura 7-4 muestra el resultado de combinar los distintos materiales disponibles teniendo a la arena fina como predominante. Se encontró que la gradación más indicada para utilizar en el laboratorio requería un 80% del material #1 (arena fina), 10% del material #2 (arena gruesa) y 10% del material #4 (triturado bien gradado). Para esta combinación granulométrica se encontró un $R^2=0.965$ como coeficiente de determinación al realizar la comparación entre la gradación buscada y la gradación generada. Según estos resultados, la cantidad de material total disponible para experimentación se calcularía con base en la disponibilidad del material más escaso, que en este caso corresponde al #2 y #4 cada uno con 50 kg. Finalmente se encuentra que habría 500 kg de materiales aprovechables para la modelación, o en términos de volumen, 300 litros aproximadamente.

8. Descripción del modelo físico

El modelo físico se construyó dentro de la instalación UISA, se acopló a ésta, y utilizó parte de sus recursos. A pesar de que se buscaba intervenir lo menos posible la instalación, fue necesario modificar un pequeño sector del canal y habilitar un paso adicional de caudal a través de 5 orificios de 4 pulgadas. En esta sección se hace una descripción del modelo, el acople de este a la instalación UISA, el proceso de construcción y su forma de operación.

8.1 Diseño del modelo y acople a la UISA

8.1.1 Localización del modelo

Según la geometría propia de la EEARC, y en búsqueda de alterar lo menos posible el canal original de la UISA, la localización óptima de la Estación aprovechó los desniveles escalonados ubicados entre la abscisa 3 m y 5.35 m, zonas 2 y 3 del canal utilizado (Figura 8-1). Fue en estos lugares donde se ubicaron los canales de conexión en pendiente y los cárcamos de bombeo. Como se muestra en la imagen (perfil), esto conllevó a la necesidad de que tanto la base del ITC, como de la mayor parte de la Estación requiriese de algún tipo de cimentación que le diera la estabilidad y resistencia requerida al momento de los ensayos.

En la abscisa -1.7 m, la tubería ITC se apoyó en los muros de aquietamiento del tanque de entrada de agua, en la zona 1 fue necesario colocar un apoyo en concreto que le diera estabilidad tanto a la tubería, como a la entrada del modelo. En la zona 2 se colocaron ladrillos y bultos de arena para darle apoyo a los canales de conexión, y en la zona 3 fue necesario llenar con gravilla hasta la cota requerida el espacio restante para darle la cimentación suficiente a los cárcamos de bombeo y zona de sedimentos.

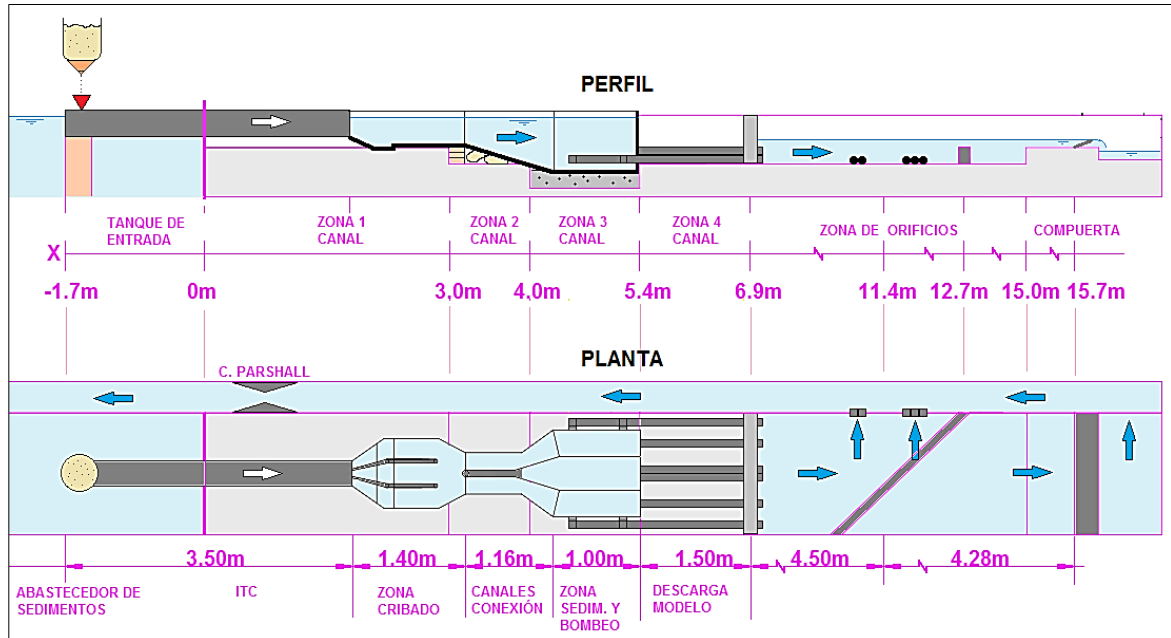


Figura 8-1. Esquema general modelo físico EEARC

8.1.2 Abastecimiento de caudal líquido

Como se comentó en la descripción de la UISA, la instalación toma el agua de un tanque de almacenamiento subsuperficial para luego conducirla, con la ayuda de equipos de bombeo, al tanque de entrada de la instalación y luego, por simple rebose, al canal. Por este motivo, fue necesario cerrar justo en la abscisa 0 cm, y con ayuda de una lámina acrílica resistente, el paso de agua hacia el canal. Además, en la abscisa 6.9 m, se construyó un muro divisorio para garantizar que el agua de descarga no se devolviera y afectara la integridad del modelo. Con base en esto, colocando la tubería del ITC en el tanque de entrada, sería el único camino de ingreso del flujo hacia al modelo, el cual se planeó que fuese por rebose.

Como se muestra en la Figura 8-1, fue necesario permitir que el agua en el tanque de entrada superara la cota batea del ITC, y que de esta forma comenzara su flujo hacia el modelo de la EEARC. Esta tubería se cimentó en el muro de aquietamiento del tanque de entrada y tuvo una longitud de 3.5 m, la cual se consideró suficiente para representar las condiciones hidráulicas de entrada del prototipo bajo una pendiente del 1 por 1000. El caudal de entrada al modelo fue regulado utilizando las válvulas V3 y V4 de la Figura 4-2, las cuales permitían, al operarse conjuntamente, un aumento o disminución en el caudal

de retorno bombeado hacia el tanque de almacenamiento y en el caudal entregado bombeado hacia el modelo.

8.1.3 Descarga y aforo de caudal líquido

En el prototipo, la EEARC descarga las aguas recibidas por el ITC a través de 6 bombas centrífugas hacia la PTAR Canoas. En el modelo, estas bombas fueron representadas a través de 6 salidas de caudal (Descarga Modelo en la Figura 8-1), de las cuales 4 de éstas, debido a limitaciones de espacio en el canal de la instalación, compartieron la tubería de descarga (2 bombas laterales de cada cárcamo), y las dos tuberías restantes contaron con su propio conducto de entrega. Tanto las tuberías como los accesorios utilizados se instalaron en PVC con diámetro de 4 pulgadas, garantizando así la capacidad de descarga del modelo para el caudal máximo, y no requerir un excesivo nivel en los cárcamos de bombeo.

Por su parte, el flujo con los sedimentos derivados por los excluidores fue descargado a la zona central entre los dos cárcamos de bombeo (Zona Sedim. y Bombeo en la Figura 8-1). De allí, solo el agua fue expulsada hacia el exterior a través de dos tuberías de PVC de 4 pulgadas, manteniendo los sedimentos depositados. Los conductos de salida del sedimentador fueron colocados a una altura mayor a los de los cárcamos de bombeo, para que permitiese la correcta sedimentación del material granular (Descarga Modelo en la Figura 8-1). El caudal fue medido utilizando la canaleta Parshall ubicada en el canal de retorno. Esta estructura de aforo fue descrita previamente en la sección 6 en donde se presentó la curva de calibración en la Figura 4-7 y la ecuación (4.1) obtenida por Flórez (2008).

8.1.4 Control de niveles y condiciones de operación

Los niveles de operación de la EEARC se obtuvieron de las condiciones reales de diseño de la Estación, y se controlaron a partir del grado de apertura de los conductos de las bombas y del nivel de agua externo al modelo. Dado que no se contó con equipo para reproducir el bombeo real en cada una de las seis bombas, se utilizaron conductos libres de 4 pulgadas con tapas capaces de controlar la descarga simulando diferentes caudales de salida de forma simétrica. El nivel de flujo al exterior de la Estación, aguas abajo del modelo, se estableció utilizando 5 orificios de 4 pulgadas de diámetro localizados alrededor

de la abscisa 11.4 m, y la compuerta basculante propia de la UISA en la abscisa 15.7 m (Figura 8-1).

Con base en lo anterior, para definir la forma de control de los niveles del modelo, tanto para los cárcamos de bombeo, como para la zona de sedimentos, se hizo un cálculo hidráulico preliminar para determinar los niveles a mantener dentro y fuera de la Estación, y posteriormente durante la iniciación de los ensayos se ajustaron las aperturas para conseguir los niveles deseados.

8.1.5 Abastecimiento y exclusión de sedimentos

El abastecimiento de sedimentos al modelo se hizo con material totalmente seco para poder controlar adecuadamente las cantidades (volúmenes) entregadas. El sistema de abastecimiento de sedimentos consistió en un tanque de almacenamiento de material granular, un embudo de entrega con posibilidad de cambio de boquilla, y un embudo de recibo que a su vez entrega el material al ITC. La Figura 8-2 muestra el dosificador de sedimentos construido para el modelo, donde se puede observar que la entrega de material granular al flujo se realiza en dos fases: una inicial donde el dosificador entrega los sedimentos al embudo #3, y otra donde éste descarga el material al ITC con la ayuda de un pequeño flujo de agua adicional.

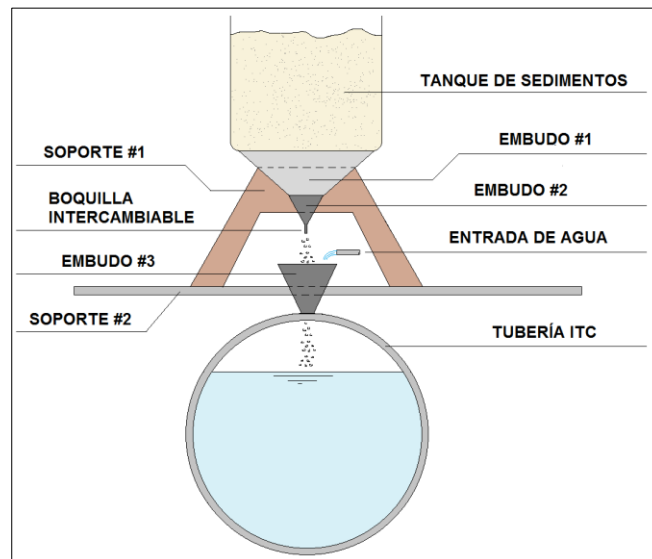


Figura 8-2. Dosificador de sedimentos modelo EEARC.

La razón por la cual se realizó el abastecimiento de sedimentos de esta manera radica principalmente en que se debía garantizar que la boquilla del embudo #2 no entrara en contacto con el agua, ya que podría atascarse muy fácilmente. El embudo #3 estando aislado del resto de material contó con un flujo pequeño de agua (alrededor de 5 ml/s) para evitar atascamientos en la entrega. Para que el dosificador funcionase adecuadamente era necesario garantizar que la capacidad de paso de sedimentos del embudo #3 fuese mayor que la del embudo #2. De esta forma, la carga sólida entregada por el embudo #1 ingresaba a una tasa constante al modelo.

El tanque de sedimentos tuvo una capacidad de abastecimiento alrededor de 1 hora y era llenado cada 45 minutos. Los embudos 1 y 2 permitían un deslizamiento suave del material reduciendo el riesgo de atasco y posteriormente permitía la salida por la boquilla intercambiable. Se utilizaron dos boquillas diferentes las cuales permitían un abastecimiento promedio de 18 kg/h y 38 kg/h de sedimentos.

Los exclusores fueron instalados con tubería PVC de 1 pulgada y de la misma forma como se muestra en la Figura 5-13. El caudal derivado por éstos dependió de la carga y gradiente hidráulico definido en función de la diferencia entre los niveles del agua sobre éstos y la zona de depósito de sedimentos. Tanto los exclusores tipo alcantarilla, como los exclusores a 45° tuvieron tuberías independientes lo que redujo en gran medida el taponamiento por material. Por su parte, la zona de depósito de sedimentos, (el foso del vertedero de excesos), se diseñó con la misma longitud de los cárcamos de bombeo y con una descarga a una elevación mayor en búsqueda de fomentar la sedimentación del material recolectado por los exclusores. En el prototipo, los niveles en este foso se mantendrían con una bomba de achique, que devuelve el agua a los cárcamos de bombeo.

8.2 Proceso de construcción del modelo

El modelo de la EEARC se construyó principalmente en 6 fases: primero, con ayuda de un software de dibujo se escaló la Estación al tamaño requerido y se imprimieron las piezas básicas para posterior corte de materiales, luego se empezó con la construcción de la zona de cribado, con la construcción de los canales de conexión, posteriormente con los cárcamos de bombeo, luego se unieron las partes y se impermeabilizó completamente el interior del modelo. Finalmente se construyó el sistema de abastecimiento de sedimentos.

8.2.1 Escalado de la EEARC e Impresión de partes

Teniendo en cuenta que la escala geométrica resultó con un valor de $L_r = 13.78$, todas las dimensiones de las partes de la Estación fueron reducidas en función de este factor. Aprovechando el uso de un software de dibujo técnico como AutoCAD, fue posible aislar las partes y reorganizarlas para impresión. El objetivo era el imprimir a escala real de modelo los componentes más relevantes y que requiriesen mayor precisión en el corte, a la vez de que se optimizaba el uso de las láminas de Dry-Wall disponibles (Figura 8-3).

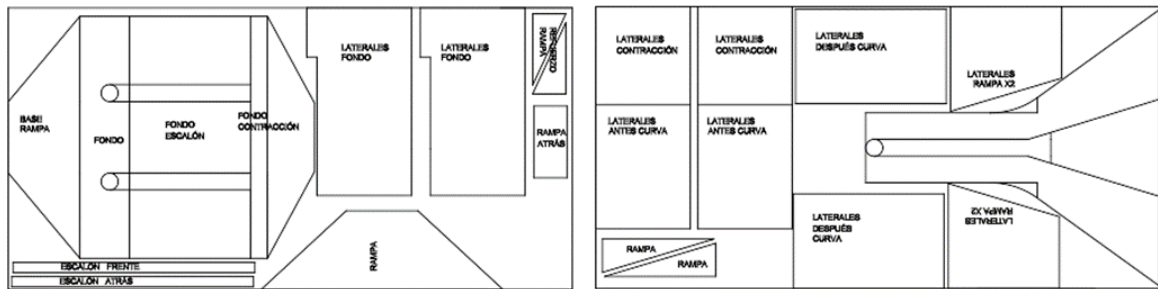


Figura 8-3. Distribución de piezas sobre lámina para corte.

8.2.2 Construcción de zona de cribado

La zona de cribado, que como ya se ha comentado, está compuesta por la transición de entrada en expansión, los canales de cribado y la transición en contracción hacia los canales de conexión, fue construida en ese mismo orden. Se utilizaron como materiales láminas de Dry-Wall, ángulos metálicos y de plástico para darle una primera estabilidad a las paredes, y para todos los casos pegante flexible tipo poliuretano. El uso de este pegante le dio una ligera flexibilidad a las juntas y por ende permitió una muy pequeña deformación para tolerar esfuerzos y evitar la falla del modelo en caso de ser necesario.

La Figura 8-4 muestra a la izquierda, el proceso parcial de construcción de esta zona, donde es importante resaltar la necesidad de construir soportes adicionales y refuerzos en la transición de entrada. Se observa de igual manera los excluidores de sedimento frontales que fueron instalados en la pared vertical del foso de sedimentación destinado al uso de la cuchara bivalva. En la parte derecha de la imagen, se presenta el resultado final de esta zona de cribado, donde aún no se ha realizado el proceso de impermeabilización.



Figura 8-4. Construcción parcial zona de cribado (izq.), zona de cribado finalizada (der.).

8.2.3 Construcción de canales de conexión

Los canales de conexión fueron construidos siguiendo la inclinación requerida de la pendiente de fondo, y fue necesario considerar un espacio para el paso del exclusor tipo alcantarilla central. Los exclusores a 45° fueron instalados de tal forma que las derivaciones fueran exteriores. En la Figura 8-5, se observa a la izquierda que el canal divergente en curva fue necesario construirlo utilizando otro tipo de material más flexible que el Dry-Wall. A la derecha se observan estos canales terminados donde se resalta la necesidad de utilizar refuerzos superiores e inferiores. Como soporte del peso del agua una vez el modelo entrara en operación, se colocaron bultos de arena y ladrillos por debajo de estos canales como se presentó en la Figura 8-1.



Figura 8-5. Construcción parcial canales de conexión (izq.), canales finalizados (der.).

8.2.4 Contrucción de zonas de bombeo y de sedimentos

Los cárcamos de bombeo y la zona de depósito de los sedimentos excluidos, (foso del vertedero de excesos), se reemplazaron en el modelo por secciones prismáticas de base rectangular. Como se presentó en la Figura 5-13 y como se muestra a la izquierda de la Figura 8-6; todos los excluidores de sedimentos descargan en la zona central de los cárcamos de bombeo.

Las descargas principales del modelo se realizaron mediante 6 ductos de salida de agua utilizando tuberías y accesorios de PVC. Estas salidas representaron las bombas centrífugas del prototipo, donde su apertura parcial o total simulaba las condiciones de operación de la Estación. Se resalta a la izquierda de la imagen, la necesidad de utilizar soportes y refuerzos de madera superiores, donde además el acople de las tuberías PVC a los cárcamos se realizó a presión y sellados con pegante elástico de poliuretano. Además, se muestra a la derecha un cambio total de materiales de construcción para estos cárcamos ya que, al iniciar las pruebas hidráulicas, las paredes interiores de la zona de sedimentos colapsaron por el peso y presión del agua.

Por este motivo, se optó por reconstruir este sector utilizando mampostería cubierta de pañete impermeabilizado, lo cual redujo bastante el volumen disponible del foso de sedimentación entre los cárcamos de bombeo, sin que esto tuviese influencia en la operación del modelo, ya que no se modeló la descarga de este vertedero.



Figura 8-6. Cárcamos de bombeo y foso de sedimentos; original en Dry Wall (izq.), y final en mampostería (der.)

8.2.5 Acople final del modelo e impermeabilización general

Las partes individuales del modelo se acoplaron en la localización proyectada en el canal de la UISA, y fueron adheridas entre si utilizando fibra plástica impermeabilizada que dio una continuidad suavizada. Cabe resaltar que los diseños originales y concepción de geometría fueron mantenidos desde el principio a excepción del foso del vertedero lateral que, como se explicó atrás, perdió algo de volumen por la necesidad de reconstruir los cárcamos de bombeo en mampostería (Figura 8-7). Sin embargo, debido a la baja velocidad esperada en esta zona, y a la no necesidad de modelar el vertimiento de excesos, no representó ninguna diferencia en la operación real de la Estación ni en las condiciones de sedimentación en el foso.



Figura 8-7. Modelo finalizado antes (izq.) y después (der.) de la impermeabilización

La impermeabilización del modelo se realizó en 5 capas que se combinaron entre impermeabilizantes elásticos para soportar pequeñas deformaciones, y fibrosos para soportar el carácter abrasivo de los sedimentos transportados. La Figura 8-8 muestra el proceso de acople e impermeabilización del modelo con cobertura elástica negra (izquierda) y el resultado final (derecha) donde además se observa el sellado con lámina acrílica del tanque de entrada.



Figura 8-8. Impermeabilización elástica (izq.) y fibrosa (der.).

El acople final y resultado del proceso de construcción del modelo físico de la EEARC se presenta en la Figura 8-9. Se resaltan la gran cantidad de soportes y refuerzos que fueron necesarios en la construcción, para lo cual se utilizaron travesaños, y especialmente en las curvas de los canales de conexión, dos muros de mampostería resistentes que soportaran las presiones del agua en estas zonas. La reja de cribado fue instalada al final del proceso.



Figura 8-9. Construcción del modelo EEARC finalizada.

8.2.6 Construcción del dosificador de sedimentos

El dosificador de sedimentos, como se presentó en la Figura 8-2, utilizó la gravedad como mecanismo de entrega del material granular al modelo. La Figura 8-10 muestra los materiales utilizados para su construcción, los cuales como se nota, fueron elementos de fácil obtención tales como un tanque de agua comercial, embudos de diferentes tamaños y una butaca pequeña para darle soporte al dosificador. Para la entrada de los sedimentos a la tubería ITC fue necesario perforar un orificio en la tubería a 20 cm de la entra del flujo, y garantizar con ello que todo el material ingresado por el dosificador viajase hacia la EEARC y no cayese fuera del sistema.



Figura 8-10. Construcción de dosificador de sedimentos.

8.3 Procedimiento de operación del modelo

1. Antes de comenzar con el experimento, verificar que todos los soportes adicionales del modelo estén correctamente ubicados, además que las descargas de agua en los cárcamos de bombeo estén completamente abiertas.
2. Llenar el tanque de entrada y generar un paso de agua suave por rebose al ITC. Cerrando las salidas de los cárcamos de bombeo, se permite el llenado gradual y suave del modelo sin que los excluidores superficiales a 45° sean afectados por el impacto directo del flujo.

3. Aumentar gradualmente el caudal por el sistema mientras se abren las descargas de los cárcamos de bombeo y se verifica la condición de caudal con la canaleta Parshall. Para esto, debido a que la bomba no presenta variador de velocidad, el caudal de flujo debe ser establecido operando las válvulas V3 y V4 mediante prueba y error (Figura 4-2).
4. Una vez se tiene establecido correctamente el caudal, se establece el nivel de operación en los cárcamos de bombeo. Para esto, si se requiere un caudal alto derivado por los esclusores, el nivel en los cárcamos de bombeo es obtenido entrecerrando las salidas de flujo de las bombas y permitiendo el paso del caudal a través de los orificios de descarga aguas abajo del modelo. Por otro lado, si se requiere un caudal bajo derivado por los esclusores, el nivel en los cárcamos de bombeo es obtenido al entrecerrar los orificios de descarga aguas abajo y variar el nivel utilizando la compuerta basculante de la instalación UISA.
5. Si el experimento no requiere del ingreso de sedimentos al modelo, la medición de los parámetros hidráulicos debe realizarse luego de que se alcanza y se garantiza la estabilización de las condiciones de caudal y nivel. Por otro lado, si se requiere la presencia de material granular, éste debe prepararse ajustando la combinación granulométrica definida anteriormente. Para la incorporación de los sedimentos al modelo, se debe instalar la boquilla requerida del dosificador y verter el material directamente en el tanque de sedimentos. Es necesario, durante la experimentación, mantener el libre flujo de material, desatascando cuando fuese necesario el dosificador.
6. Si el experimento no requiere la presencia de sedimentos, una vez terminada la sesión es necesario que sea evacuada toda el agua, tanto del tanque de entrada, como de la zona de sedimentos. Esto en búsqueda de que el agua sea retornada al tanque de almacenamiento. Para el caso en el que haya presencia de sedimentos, al terminar el experimento, se debe, en coordinación con la operación del equipo de bombeo, detener el flujo de agua tanto en la entrada del modelo, como en la salida. De esta forma, se puede mantener las condiciones de forma y depósitos al fondo de la Estación mientras que se descarga gradualmente el agua del modelo.

9. Programa experimental

El presente estudio estuvo dividido en dos fases: una primera donde se hizo el estudio hidráulico de las propuestas de alternativas de geometría, y una segunda fase donde se evaluaron las condiciones de transporte y exclusión de sedimentos de la Estación. En esta sección se hace una descripción del programa experimental de cada una de las fases mencionadas, las características generales de los experimentos, instrumentos y formas de medición, y criterios para analizar los resultados.

9.1 Modelación hidráulica sin sedimentos

9.1.1 Condiciones de operación del modelo

El objetivo principal de la modelación hidráulica sin sedimentos consistió en evaluar de forma general la respuesta de la EEARC bajo diferentes condiciones de caudal y niveles de operación, teniendo en cuenta las propuestas de geometría del modelo y la repartición de flujo en la zona de cribado. Se consideraron cuatro condiciones de caudal de operación de la Estación y niveles de lámina de agua en los cárcamos de bombeo, (referenciados al fondo) como se muestra en la Tabla 9-1. Estas fueron tomadas del diseño detallado de la Estación, en consideración a las necesidades de altura de succión de las bombas.

Tabla 9-1. Condiciones de operación estudiada en prototipo y modelo

Caudal	Q Prototipo (m ³ /s)	Nivel cárcamos prototipo (m)	Q modelo (l/s)	Nivel cárcamos modelo (cm)	No. bombas trabajando
Bajo*	9.6*	6.84	13,6	50.0	1
Medio	16.0	7.34	22.7	53.3	3
Medio Alto	32.0	8.23	45.4	59.7	6
Máximo	36.2	8.54	51.4	62.0	6

* El caudal mínimo de la Estación es menor, del orden de 5 m³/s; sin embargo, no resultó posible lograrlo.

Las condiciones de operación fueron definidas en búsqueda de entender el comportamiento general de la Estación, desde flujo bajos hasta flujos altos. Los caudales y niveles fueron escalados al modelo siguiendo los factores de escala definidos anteriormente. Por otro lado, se espera que el número de equipos de bombeo trabajando varíe en función del caudal de la Estación, por lo que se estima que para el caudal mínimo pueda estar una sola bomba en funcionamiento, para el caudal medio 3 bombas, y para los dos caudales más altos, todas sus bombas trabajando.

A pesar de que el caudal mínimo de la Estación es del orden de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, no resultó posible graduar caudales por debajo de 13.6 l/s dado que la bomba disponible en el laboratorio no tiene graduación de velocidad y el caudal se debe ajustar mediante una válvula que no permite ese nivel de precisión en los caudales más bajos. El caudal mínimo entonces no fue posible modelarlo, por lo que se tomó el caudal más bajo posible, el cual corresponde a $9.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en el prototipo, es decir, alrededor del doble del mínimo.

9.1.2 Toma de datos experimentales

La toma de datos se realizó de manera sistemática en función de los equipos utilizados para ese fin. Se probó en utilizar inicialmente 2 instrumentos diferentes para medición de velocidad en los canales de cribado, y se compararon sus ventajas y desventajas frente a este tipo de estudios. La medición de profundidades de flujo se realizó utilizando cinta métrica o limnómetros digitales para el caso de la lectura en la canaleta Parshall.

Según las condiciones de operación de la Tabla 9-1 y graduando la apertura de las válvulas de flujo de agua hacia el modelo, se establecieron los caudales requeridos según la curva de calibración y ecuación de la canaleta Parshall en el canal de retorno (Figura 4-7). Esta curva fue definida entre caudales de 1 l/s y 100 l/s y niveles entre 2 cm y 46 cm . Según esta, los niveles en la canaleta Parshall para los caudales del modelo deben ser:

Tabla 9-2. Niveles en canaleta Parshall para caudales del modelo

Caudal	Q modelo (l/s)	Nivel Canaleta Parshall (cm)
Bajo	13.6	11.9
Medio	22.7	17.0
Medio Alto	45.4	27.5
Máximo	51.4	29.9

Para alcanzar los niveles de operación de la Estación se siguió la metodología establecida en la sección 10.3, donde se establecieron los niveles requeridos en los cárcamos de bombeo a partir del control de las descargas de salida, variando el nivel aguas abajo del modelo a la salida de las seis tuberías que representan las bombas de la Estación, o el grado de apertura de estas salidas.

Como instrumentos candidatos para la medición de velocidades de flujo en los canales de cribado, se probó un micro molinete con dos hélices de distinta sensibilidad, y un tubo Pitot. De igual manera, se hizo una medición de las fluctuaciones de nivel bajo cada condición de operación en los cárcamos de bombeo y además se hizo una descripción cualitativa de la turbulencia y vorticidad tanto en los cárcamos de bombeo como en el resto del modelo.

A continuación, se hace una descripción general de los instrumentos probados para la medición de velocidades en los canales de cribado, además de las consideraciones tenidas en cuenta al momento de su uso:

- **Tubo Pitot**

Se probó el uso de un tubo Pitot con lectura manométrica inclinada. Este instrumento fue fabricado de forma artesanal utilizando un tubo delgado de vidrio con una boquilla muy estrecha y doblada con un ángulo de 90° , manguera transparente, madera y una regla para la lectura del desplazamiento del fluido, (Figura 9-1).



Figura 9-1. Tubo Pitot construido

Para definir la forma de manejo y uso del tubo, se estimaron las posibles velocidades que se pudiesen encontrar en el modelo y que deberían ser representadas por el medidor. De esta forma, para un caudal de flujo Q que fuese repartido equitativamente en los 3 canales de cribado, se tendría una velocidad media U y carga de velocidad definidas como:

$$U = \frac{Q}{3Bh} \qquad \frac{U^2}{2g} = \frac{Q^2}{18gB^2h^2} \qquad (9.1)$$

Donde B es el ancho de cada canal de cribado y h es la profundidad del flujo. Haciendo conservación de energía entre un punto antes de la boquilla del tubo Pitot, y justo en la boquilla (Figura 9-2), se tendría que:

$$Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{U_a^2}{2g} = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \frac{U_b^2}{2g}$$

Donde los subíndices a y b representan un punto antes de la boquilla y justo en la boquilla, Z es la cota de los puntos de análisis, $\frac{P}{\gamma}$ es la presión sobre cada punto, $\frac{U^2}{2g}$ es la carga de velocidad y se desprecian las pérdidas de energía en el tramo de análisis.

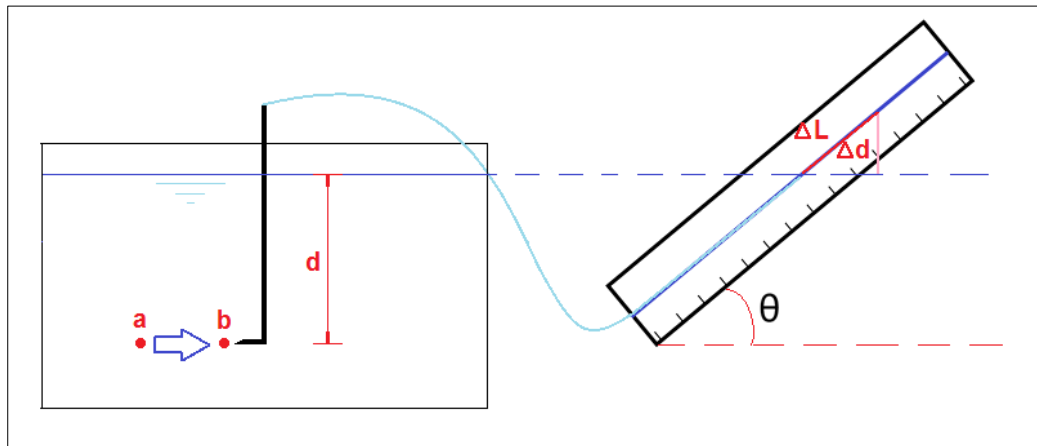


Figura 9-2. Esquema del tubo Pitot construido

Asumiendo que en la boquilla se da el estancamiento de las partículas de fluido, la velocidad caería a cero y la expresión de energía se simplifica, siguiendo la nomenclatura de la Figura 9-2, como:

$$d + \frac{U_a^2}{2g} = d + \Delta d$$

Finalmente, como el manómetro está inclinado, un aumento en columna de agua Δh le corresponde un desplazamiento de la columna de agua ΔL afectado por el ángulo de inclinación θ . De esta manera, la carga de velocidad del flujo en el punto antes de la boquilla sería definido, en función de la lectura ΔL como:

$$\frac{U_a^2}{2g} = \Delta d = \Delta L \sin(\theta) \quad (9.2)$$

Según lo anterior, utilizando las ecuaciones (9.1) y (9.2), es posible estimar la columna adicional de lámina de agua Δd que le correspondería un caudal Q determinado y el ángulo necesario para garantizar una lectura suficiente en el manómetro (aproximadamente 1.5cm). De esta forma, para el caudal medio de la modelación (22.7 l/s), $h=23$ cm y $B=25$ cm se requeriría:

$$\frac{Q^2}{18gB^2h^2} = \Delta d \approx 1mm \quad \theta = \text{asin}\left(\frac{\Delta d}{\Delta L}\right) = 3.8^\circ \approx 5^\circ$$

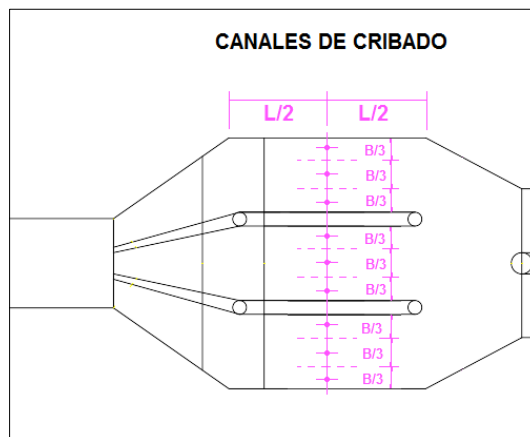


Figura 9-3. Localización de mediciones con tubo Pitot.

La Figura 9-3 muestra la ubicación de las mediciones de prueba realizadas con el tubo Pitot en el modelo. Éstas fueron localizadas en la sección media de los canales de cribado, a una profundidad media del flujo y en los cuales se realizaron 3 mediciones por canal.

Finalmente, se decidió por no utilizar este instrumento, debido a que se presentaban dificultades en la medición de la columna de fluido. Específicamente, como se muestra en la Figura 9-4, se observó que, debido al bajo ángulo de inclinación del manómetro, se presentaban efectos asociados a la tensión superficial y a la capilaridad, que dificultaban la lectura del instrumento con la precisión requerida.

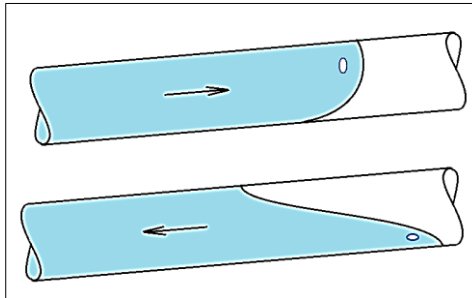


Figura 9-4. Comportamiento ascendente o descendente de la cuña de agua inclinada.

Puntualmente, se notó que, si la columna de fluido realizaba un movimiento ascendente o descendente en el tubo, previo a la realización de la medición, dada las propiedades del conducto y del agua, se observaba uno de los dos casos presentados en la Figura 9-4. Esto implicaba una alta incertidumbre en la medición del desplazamiento del fluido en el manómetro inclinado, y qué, sumado a la baja velocidad del flujo, imposibilitó realizar lecturas confiables.

- **Micromolinete**

Fue utilizado un micromolinete del Laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional sede Bogotá, al que se le fue acoplada dos hélices diferentes. El cuerpo del instrumento tiene la referencia No C2 339992, donde una de las hélices fue calibrada en la UNAL con referencia H-4-327840, (de ahora en adelante llamada hélice H-4), y la otra de mayor sensibilidad fue calibrada externa a la UNAL con referencia H-1-81509, (de ahora en adelante llamada H-1). Se utilizaron estas dos posibilidades de medición para permitir una

toma de datos más confiable de acuerdo con las velocidades de flujo esperadas en el modelo. La Figura 9-5 muestra el cuerpo del micromolinete utilizado, junto con una de las hélices empleadas.

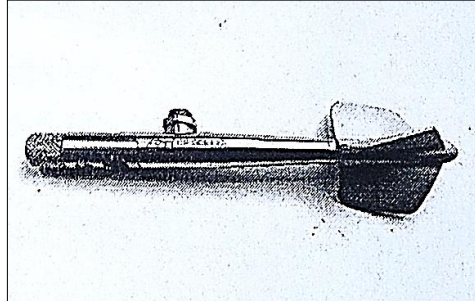


Figura 9-5. Micromolinete utilizado en la experimentación.

La Figura 9-6 muestra las hélices utilizadas en la experimentación, donde se presenta a la izquierda, la hélice de alta sensibilidad, que debido al mayor contacto con el flujo genera una mayor cantidad de revoluciones por unidad de tiempo, y a la derecha, la de sensibilidad media, que debido a su geometría presenta un menor contacto directo con el flujo y por tanto menor cantidad de revoluciones por unidad de tiempo.



Figura 9-6. Hélice de alta sensibilidad (izq.) y de sensibilidad media (der.)

Como se muestra en la Figura 9-7, las mediciones realizadas con el molinete se realizaron aguas abajo del desnivel previo a los canales de cribado (zona de la cuchara bivalva), y aguas arriba de la reja de cribado a las distancias que se muestran. Estas localizaciones fueron planeadas para estimar de mejor manera las velocidades presentes en los canales de cribado y el comportamiento espacial del flujo. Para la toma de datos, se hizo la división (en planta) de cada canal en tres franjas iguales, y la medición se realizó en la mitad del ancho de estas. En perfil, debido las condiciones turbulentas del flujo, las mediciones se realizaron en los tercios de la profundidad.

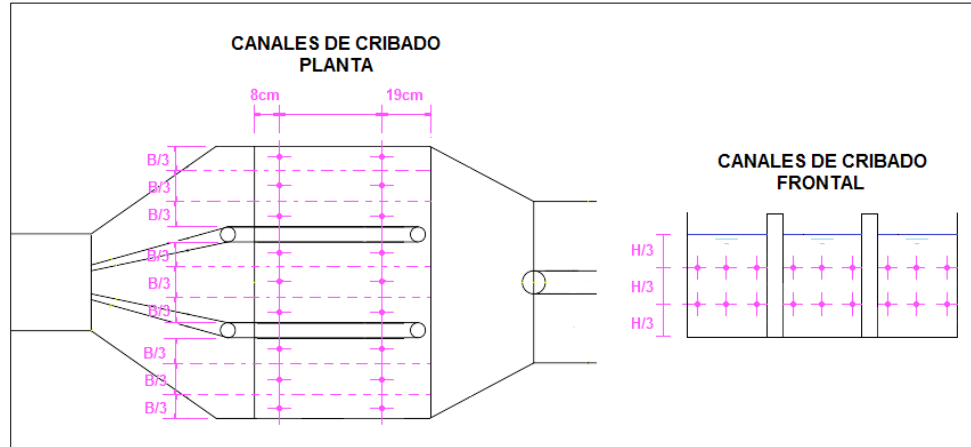


Figura 9-7. Localización de mediciones con micromolinete

La Figura 9-8 presenta las ecuaciones de calibración de las hélices utilizadas en la experimentación. Se nota que tienen sensibilidades que difieren en casi un factor de 10, lo cual resultó adecuado para registrar las velocidades de flujo observadas.

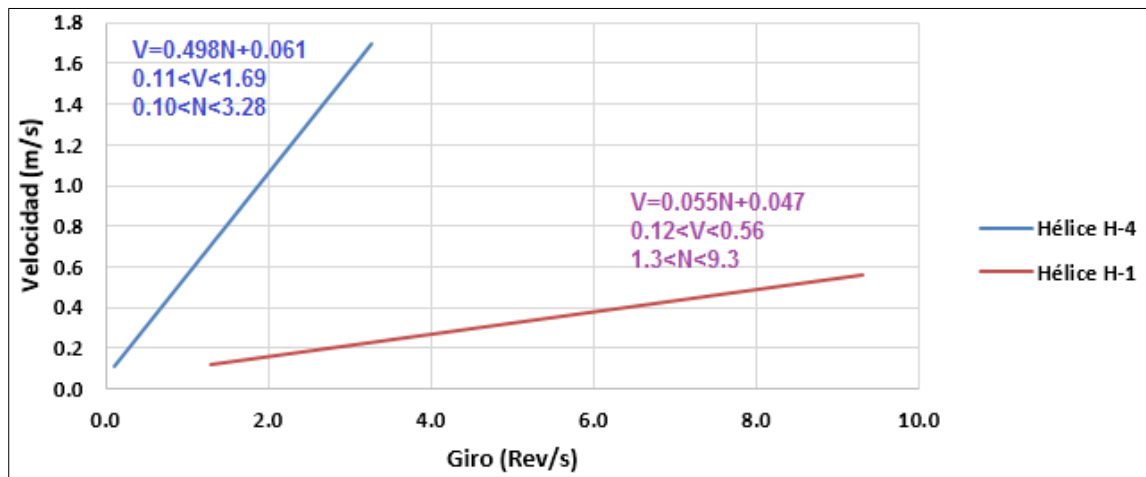


Figura 9-8. Ecuaciones de calibración y validez de uso de cada hélice

Para validar el correcto funcionamiento de este instrumento y para cada condición de caudal de operación, se hizo la comparación entre el caudal determinado por la canaleta Parshall, y el caudal estimado a partir de las mediciones puntuales de velocidad con el molinete en el canal de retorno. Se aprovecharon las condiciones de flujo uniforme, lo que garantizó una estimación controlada del caudal utilizando las dos hélices. Para esta

estimación se realizaron 6 mediciones en la sección transversal del canal de retorno, de la misma forma como se realizaron en los canales de cribado (Figura 9-7).

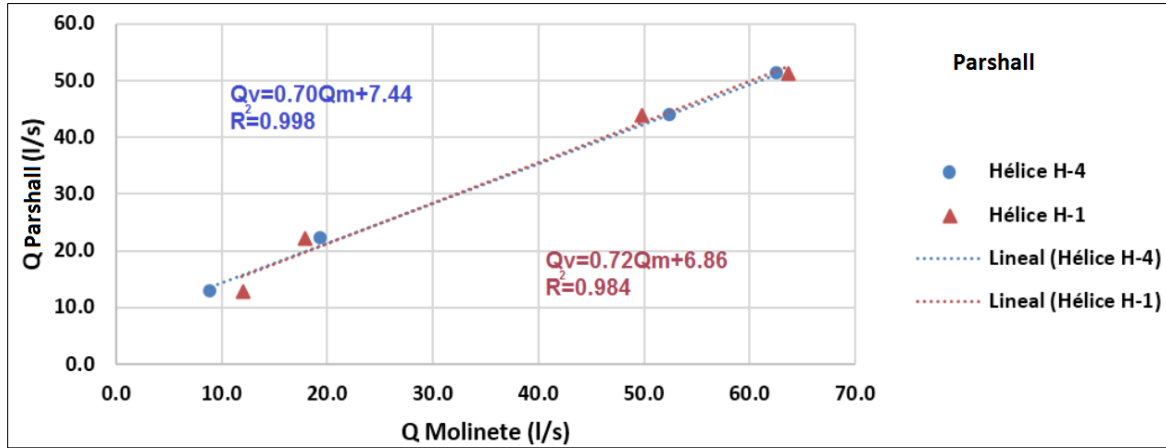


Figura 9-9. Correlación Q canaleta Parshall vs Q molinete (Flujo Uniforme).

De la Figura 9-9, se observa que hay una clara dependencia lineal entre estas variables, pero donde se resalta el hecho de que el molinete sobreestima ligeramente las mediciones realizadas con la canaleta Parshall. Adicionalmente, se observan unas correlaciones muy similares dando a entender que los resultados arrojados por ambas hélices son comparables entre sí en estas condiciones de flujo.

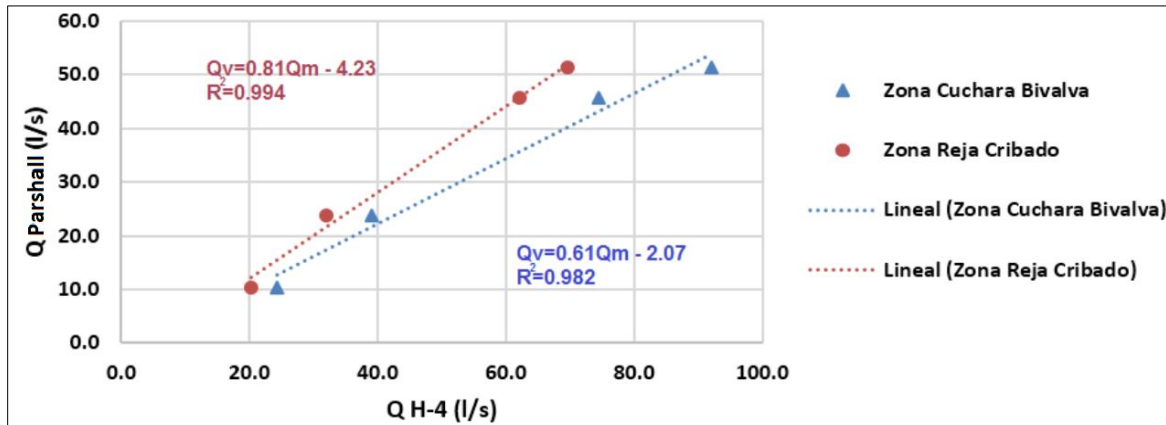


Figura 9-10. Correlación Q canaleta Parshall vs Q molinete H-4 (Flujo RV).

Luego de realizar las mediciones y correlaciones en la condición de flujo uniforme del canal de retorno, se hizo la medición del caudal bajo las condiciones de flujo rápidamente variado

en los canales de cribado. La Figura 9-10 y la Figura 9-11 muestran las correlaciones entre los caudales determinados utilizando el molinete con ambas hélices y el caudal definido por la canaleta Parshall. Se observa una evidente correlación lineal para cada tipo de hélice y para cada sector de medición en la zona de cribado.

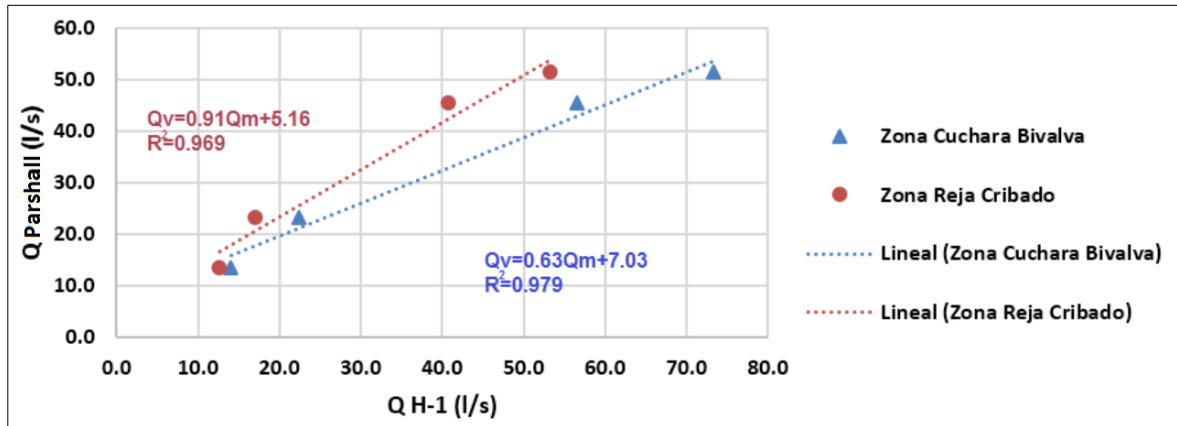


Figura 9-11. Correlación Q canaleta Parshall vs Q molinete H-1 (Flujo RV).

Como se muestra en las anteriores gráficas, la medición del caudal a partir de las velocidades medidas por el molinete, produce valores diferentes a la medición con la canaleta Parshall, lo cual es debido a la falta de uniformidad del flujo en la sección de las cámaras de cribado, donde no alcanza a desarrollarse plenamente un flujo uniforme y abundan los chorros individuales, las corrientes secundarias y la turbulencia. Para corregir esta sobreestimación en las velocidades promedio medidas en los canales de cribado, se consideró una corrección definida como:

$$U_c = K_1 U_m + \frac{K_2}{Bh} \quad (9.3)$$

Donde U_c y U_m son las velocidades medias corregidas y medidas en los canales de cribado, K_1 y K_2 son el primer y segundo coeficiente de regresión lineal definidos en la Figura 9-10 y Figura 9-11, B es la base del canal de cribado y h la profundidad de flujo.

9.2 Modelación hidráulica con sedimentos

9.2.1 Condiciones de operación del modelo

Para esta fase, se consideraron las condiciones de operación que se muestran en Tabla 9-3, donde se observa que el comportamiento del transporte y exclusión de sedimentos se estudió para condiciones de carga media y alta transportados por los caudales de operación considerados anteriormente.

Tabla 9-3. Condiciones de operación buscadas para modelación sedimentológica.

Caudal	Q_{lp} (m ³ /s)	Q_{lm} (lt/s)	Carga Sólida	Q_{sm} (m ³ /día)	Q_{sp} (l/hora)	t_{sr}
Bajo	9.6	13.6	Media	20	12.0	37.5
Medio	16.0	22.7	Media	20	12.0	37.5
			Alta	284	25.3	5.6
Medio alto	32.0	45.4	Media	20	12.0	37.5
			Alta	284	25.3	5.6
Máximo	36.2	51.4	Media	20	12.0	37.5
			Alta	284	25.3	5.6

Para cada uno de los caudales de operación ensayados con flujo de sedimentos, se considera la misma forma de operación de niveles que para la modelación hidráulica sin sedimentos. Las escalas de tiempo sedimentológico se calculan en función de la carga de sedimentos que realmente fue ingresada al modelo durante el tiempo de ensayo, descontando los sedimentos que permanecieron en el ITC.

9.2.2 Toma de datos experimentales

La toma de información y datos experimentales tuvo carácter cualitativo y cuantitativo. Con respecto a la información cualitativa, se hizo una descripción del fenómeno de transporte y depositación de los sedimentos presentes en el modelo, y por ende su comportamiento en el prototipo. Se identificaron zonas de alto, medio y bajo depósito de material granular, al igual que se caracterizaron las formas de las barras encontradas en el fondo. Estas caracterizaciones estando siempre respaldadas por registros fotográficos y de video.

Como mediciones directas sobre el modelo, (cuantitativas), se destaca el monitoreo de niveles de lámina de agua en la zona de cribado, en los cárcamos de bombeo, en la zona de acumulación de sedimentos, y aguas abajo del modelo. Específicamente, la medición

de estos dos últimos, permitió estimar hidráulicamente el caudal total derivado por los excluidores de sedimentos. Bajo un estado de flujo permanente en el modelo, alcanzado luego de un tiempo suficientemente largo, no hay cambios de nivel dentro de la Estación, y por tanto, podría afirmarse que el caudal de entrada y salida de la estructura son iguales.

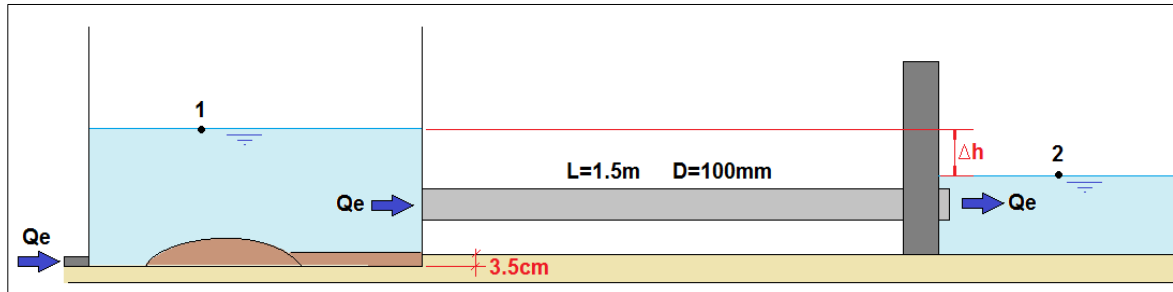


Figura 9-12. Descarga de caudal derivado por los excluidores.

Como se nota en la Figura 9-12, el caudal derivado por los excluidores Q_e puede estimarse analizando la condición permanente de descarga como se muestra en la imagen. Haciendo conservación de energía entre el punto 1 en la zona de sedimentos, y el punto 2 en la descarga del modelo se tiene:

$$Z_1 = Z_2 + \frac{fL}{D} \left(\frac{U_e^2}{2g} \right) + K \left(\frac{U_e^2}{2g} \right)$$

Donde Z_1 y Z_2 son los niveles de lámina de agua en las secciones de análisis tomando como punto de referencia el fondo de la zona de sedimentos, U_e es la velocidad de flujo por la tubería de descarga de la zona de sedimentos, f el factor de fricción de Darcy Weisbach, D y L el diámetro y longitud de la tubería de descarga, g la aceleración de la gravedad y K la constante total de pérdidas locales. Considerando un coeficiente K de 1.6 por entrada y salida de la tubería, factor de fricción f de 0.025, características geométricas del conducto y del sistema, además de despreciar la velocidad de flujo en el punto 2 se tendría que el caudal derivado por las dos tuberías de descarga sería aproximadamente:

$$U_e = (0.7) \sqrt{2g(\Delta h)} \quad Q_e = (0.011) \sqrt{2g(\Delta h)} \quad (9.4)$$

Por otro lado, se hizo la caracterización granulométrica de los depósitos, al igual que se midió el espesor y el área abarcada por estos. La eficiencia en la exclusión de los sedimentos se calculó en función de la relación de la carga de sedimentos entrante y la carga derivada; de donde se obtuvo la relación entre el caudal sólido derivado y el caudal líquido necesario para la derivación (relación de derivación). En general, todos los cálculos relacionados con mediciones de cantidad de material granular en depósitos se realizaron considerando el peso seco, determinado bien sea por secado y pesado directo, o análisis de humedad media en el laboratorio de suelos. Para realizar el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La tasa de abastecimiento total de sedimentos de entrada al modelo (Q_{st}) depende del peso seco total de sedimentos (W_{st}) utilizados durante el ensayo y el tiempo de experimentación (t) así:

$$Q_{st} = \frac{W_{st}}{t} \quad (9.5)$$

2. La tasa abastecimiento neto de sedimentos a la Estación (Q_{sn}) depende del peso seco total de sedimentos (W_{st}) utilizados durante el ensayo, el peso seco de los sedimentos remanentes en el ITC (W_{sITC}) luego del ensayo y el tiempo de experimentación (t) así:

$$Q_{sn} = \frac{W_{st} - W_{sITC}}{t} \quad (9.6)$$

3. La estimación de los sedimentos totales bombeados (W_{sb}) luego del tiempo del ensayo se calculó al considerar un balance de masas entre los pesos secos de sedimentos totales ingresados al modelo (W_{st}), excluidos en la zona de sedimentos (W_{se}), depositados en la Estación (W_{sd}) y remanentes en el ITC, así:

$$W_{sb} = W_{st} - W_{se} - W_{sd} - W_{sITC} \quad (9.7)$$

4. La carga de sedimentos o caudal sólido excluido (Q_{se}) depende del peso seco de sedimentos derivados, (W_{se}), durante el ensayo y el tiempo de experimentación (t):

$$Q_{se} = \frac{W_{se}}{t} \quad (9.8)$$

5. La eficiencia del proceso de exclusión (ε) depende tanto del caudal sólido derivado (Q_{se}) y del abastecimiento neto (Q_{sn}), como del caudal líquido utilizado por los excluidores (Q_e) y el caudal líquido total (Q). Se busca maximizar los sedimentos excluidos minimizando la derivación de agua. Como se presenta en la investigación de Ordoñez y otros (2008), esta eficiencia o relación de exclusión se define como:

$$\varepsilon = \frac{Q_{se}/Q_{sn}}{Q_e/Q} = \frac{\%Q_{se}}{\%Q_{te}} \quad (9.9)$$

Los espesores encontrados de las barras de sedimentos se caracterizaron con cinta métrica y se tuvo en cuenta la mayor profundidad encontrada en el depósito. Las gradaciones granulométricas describieron tres grupos diferentes de depósitos de sedimentos: excluidos, sedimentados en el modelo, y remanentes en el ITC.

10. Modelación sin sedimentos

Como se mencionó, la evaluación hidráulica del modelo en ausencia de material granular se realizó utilizando el molinete con las dos hélices adquiridas, y empleando material flotante para ver fenómenos superficiales asociados al contraflujo, turbulencia y vórtices. En cada una de las imágenes de este capítulo se presenta la dirección del flujo con una **flecha amarilla** para dar mayor claridad al lector.

10.1 Caudal Bajo – Inferior al Caudal Medio de la EEARC

10.1.1 Generalidades

En este ensayo se intentó obtener un caudal equivalente al mínimo de la Estación, que se ha calculado por los diseñadores en $5 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo, el hecho de que la bomba del laboratorio no tuviese control de velocidad, implicó que el caudal solo pudo variarse mediante una válvula. Esta infortunadamente no tiene una adecuada graduación para reducir el caudal en el modelo por debajo de 13.6 l/s , con lo cual se representó un caudal en el prototipo de $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Desafortunadamente el ensayo se realizó con salida únicamente por una de las tuberías del cárcamo izquierdo, condición que no es operativa en la Estación dado que la máxima capacidad de cada bomba llega solo a $6.4 \text{ m}^3/\text{s}$; ésta condición se corrigió en el ensayo con sedimentos, para el cual se trabajó con el mismo caudal pero con dos salidas simétricas, una en cada cárcamo de bombeo.

Para esta condición no se observaron fenómenos turbulentos de alta energía. Superficialmente se notaron pequeñas ondulaciones que fueron un poco más notorias en el canal de cribado central que en los laterales. Además, dado que esta condición de operación únicamente contaba con una bomba en funcionamiento en el modelo, se observó tendencia al movimiento hacia esa dirección en los canales de conexión. La Figura 10-1 muestra dos tomas generales de la condición de flujo y operación en este caso, donde se observan las ondulaciones superficiales y poca turbulencia en el modelo.



Figura 10-1. Ondulaciones superficiales y turbulencia general EEARC. Caudal Bajo

10.1.2 Repartición del flujo en canales de cribado

La Figura 10-2 muestra la zona de repartición del flujo entregado por el ITC a la EEARC, donde se nota un pequeño remanso y resalto hidráulico ahogado en los muros deflectores. Como se observa, en este caso el canal central propicia una pequeña formación de espuma por una mayor turbulencia. En general se nota un flujo de ingreso suave.

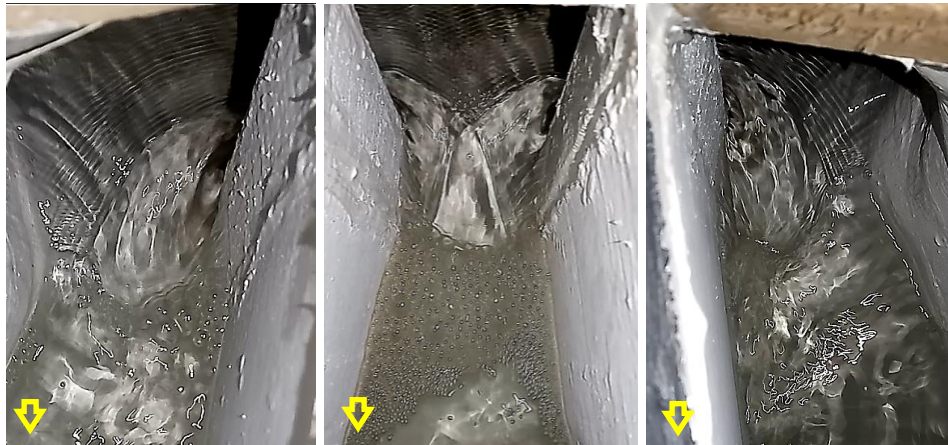


Figura 10-2. Entrega ITC a EEARC canales derecho, izquierdo y central. Caudal Bajo

La Figura 10-3 muestra para comparación directa la diferencia aparente entre las ondulaciones superficiales y turbulencia de los canales central y laterales. En la imagen, se nota una ondulación superficial de mayor tamaño en el canal central lo que en primera medida podría asociarse con un mayor paso de flujo y mayor turbulencia.



Figura 10-3. Ondulaciones y turbulencia en canales central y laterales. Caudal Bajo

La toma de datos para este caudal, debido a sus bajas velocidades, se hizo utilizando la hélice de mayor sensibilidad (H-1). Durante la sesión experimental, se buscó la condición de operación definida en la Tabla 9-2. Sin embargo, por limitaciones propias del laboratorio y regulación de caudal, las condiciones de operación alcanzadas se muestran en la Tabla 10-1.

Tabla 10-1. Condiciones de operación del modelo. Caudal Bajo.

CONDICIÓN	BUSCADO	HÉLICE H-1
Caudal	7.1 l/s	13.6 l/s
Nivel canaleta Parshall	7.6 cm	11.9 cm
Nivel cárcamo bombeo	49.6 cm	50.0 cm
Número de bombas trabajando	1 bomba izquierda	1 bomba izquierda

Durante la experimentación, se notaron mayores velocidades hacia los costados externos de los canales laterales. La diferencia de velocidades en los canales laterales pudo deberse a la incidencia de la relación entre la velocidad angular y tangencial del flujo en estos cambios de dirección, que generan menores velocidades en los costados internos de las curvas, y mayores en los costados externos. La Tabla 10-2 presenta los resultados obtenidos en cuanto a velocidad y caudal de flujo en cada canal de cribado y sección de medición con la hélice H-1. La Tabla 10-3, por su parte, presenta el resultado de repartición

de flujo estimado utilizando esta hélice, de donde se observa una tendencia marcada del paso del flujo por el canal de cribado central.

Tabla 10-2. Resultados obtenidos de caudal y velocidad. Hélice H-1. Caudal Bajo

SECCIÓN	MODELO (m/s)			PROTOTIPO (m/s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	0.070	0.187	0.070	0.260	0.695	0.260
CUCHARA	0.058	0.197	0.058	0.215	0.729	0.215

SECCIÓN	MODELO (l/s)			PROTOTIPO (m ³ /s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	3.56	9.52	3.56	2.51	6.71	2.51
CUCHARA	2.95	9.99	2.95	2.08	7.04	2.08

Tabla 10-3. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-1. Caudal Bajo

%	IZQUIERDO	CENTRO	DERECHO
REJA	21%	57%	21%
CUCHARA	19%	63%	19%
PROMEDIO	20%	60%	20%

Se concluye que, para esta condición de operación, el canal central conduce la mayor cantidad de caudal con un estimativo de entre el 57% y el 63% del caudal total de la Estación. De igual forma, el canal izquierdo conduciría entre el 19% y el 21% del caudal, y el canal derecho entre el 19% y el 21%. Debe anotarse que, durante el proceso de diseño detallado de la Estación, se realizó un modelo CFD de este esquema del pozo de cribado, que, a pesar de haberse realizado con una malla relativamente gruesa, dio resultados muy similares, con el 64% del caudal en el canal central.

10.1.3 Comportamiento de cárcamos de bombeo

Para esta condición de operación con caudal inferior al caudal promedio, se observó aguas casi estáticas en los cárcamos de bombeo como se nota en la Figura 10-4. A la izquierda de la imagen se observa el comportamiento de la superficie del agua de los dos cárcamos de bombeo del modelo. Por otro lado, a la derecha de la imagen se presenta el cárcamo izquierdo al cual se le agregó un polvillo fino superficial para notar más fácilmente cambios en la lámina de agua. En este se observa que no hay movimiento apreciable.



Figura 10-4. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Bajo

En cuanto a los canales de conexión, a simple vista se observó que, debido a la reducción gradual de velocidad en éstos, también había una reducción de oscilaciones y turbulencia en el flujo hasta llegar a la condición mencionada en los cárcamos. La Figura 10-5 muestra esta condición donde se observa que el canal de conexión izquierdo presenta un aparente mayor flujo que el derecho.



Figura 10-5. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Bajo

La Tabla 10-4 presenta los resultados obtenidos luego de la observación de los cárcamos de bombeo de la Estación. Se resalta que la variación en el nivel superficial resultó pequeña del orden de 1 mm y no se presentó ningún tipo de vorticidad superficial. Los

niveles y profundidades de lámina de agua medidos en el modelo se referenciaron al fondo local de la Estación.

Tabla 10-4. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Bajo

CARACTERÍSTICA	MODELO	PROTOTIPO
Nivel cárcamo de bombeo	50.0 cm	689.0 cm
Variación del nivel	1 mm	14 mm
Profundidad zona de cribado	20.0 cm	275.6 cm
Vórtices superficiales	NO	NO

10.2 Caudal Medio de operación

10.2.1 Generalidades

Para la condición de caudal medio no se observaron fenómenos turbulentos de alta energía. Superficialmente se notaron ondulaciones pequeñas que fueron más notorias en la zona de cribado y de menor tamaño en los cárcamos de bombeo. Esta condición de operación contaba con tres bombas en funcionamiento en el modelo, pero se buscó una simetría en el flujo general de la Estación. La Figura 10-6 muestran dos tomas generales de la condición de flujo y operación en este caso, donde se observa a la izquierda de la imagen las ondulaciones superficiales en los canales de cribado, y a la derecha la poca turbulencia aparente general de la Estación.



Figura 10-6. Ondulaciones superficiales y vista general de la EEARC. Caudal Medio

10.2.2 Repartición del flujo en canales de cribado

La Figura 10-7 muestra la zona de repartición del flujo entregado por el ITC a la EEARC, donde se nota un pequeño remanso y resalto hidráulico ahogado en los muros deflectores. Como se observa, en general se notó un flujo de ingreso suave, pero con mayor energía que el observado para caudal bajo. La Figura 10-8 muestra para comparación, la diferencia aparente entre las ondulaciones superficiales y turbulencia de los canales central y laterales. No se notó a simple vista una ondulación superficial diferente entre los canales de cribado. Se observó, en los canales laterales, flujos con mayores velocidades en los costados externos.

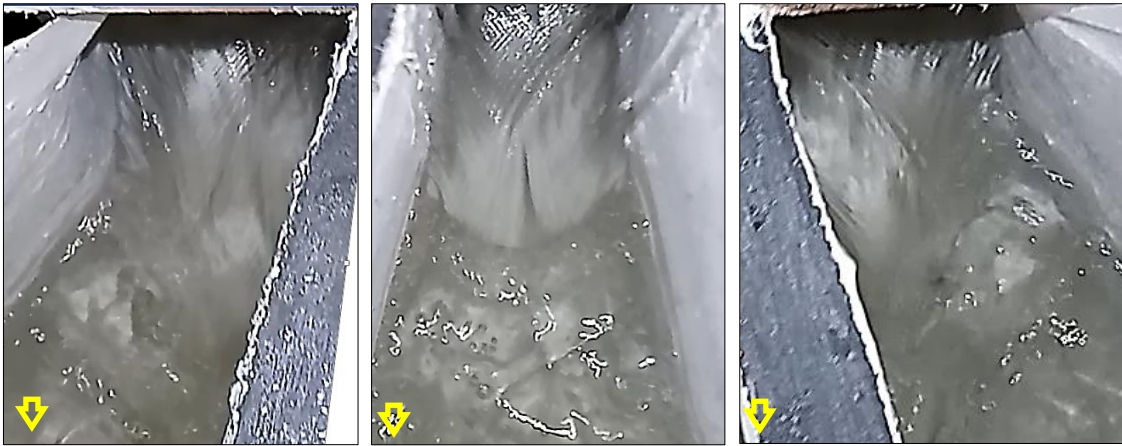


Figura 10-7. Entrega ITC a EEARC canales derecho, izquierdo y central. Caudal Medio

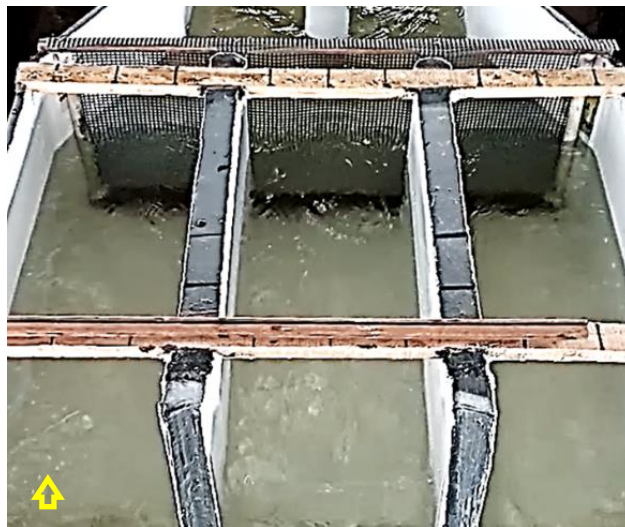


Figura 10-8. Ondulaciones y turbulencia en canales central y laterales. Caudal Medio

Tabla 10-5. Condiciones de operación del Modelo. Caudal Medio.

CONDICIÓN	BUSCADO	HÉLICE H-4
Caudal	22.7 l/s	23.7 l/s
Nivel canaleta Parshall	17.0 cm	17.5 cm
Nivel cárcamo bombeo	53.3 cm	53.0 cm
Número de bombas trabajando	1 bomba izq./2 bombas der.	1 bomba izq./2 bombas der.

La toma de datos para este caudal, debido a sus velocidades, se hizo utilizando la hélice H-4. Durante la sesión experimental, se buscó la condición de operación definida en la Tabla 9-2. Sin embargo, por limitaciones propias del laboratorio y regulación de caudal, las condiciones de operación alcanzadas se muestran en la Tabla 10-5.

Durante la experimentación, se notaron mayores velocidades hacia los costados externos de los canales laterales, y en general, para el canal central, se encontraron mayores velocidades hacia su costado derecho. La diferencia de velocidades en los canales laterales puede ser debida, como se comentó, a la incidencia de estos cambios de dirección, y que generan menores velocidades en los costados internos de las curvas, y mayores en los costados externos.

Tabla 10-6. Resultados obtenidos de caudal y velocidad. Hélice H-4. Caudal Medio

SECCIÓN	MODELO (m/s)			PROTOTIPO (m/s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	0.141	0.148	0.091	0.523	0.547	0.337
CUCHARA	0.133	0.157	0.092	0.494	0.583	0.340

SECCIÓN	MODELO (l/s)			PROTOTIPO (m ³ /s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	8.06	8.43	5.19	5.68	5.94	3.66
CUCHARA	7.61	8.99	5.24	5.37	6.33	3.70

La Tabla 10-6 presenta los resultados obtenidos en cuanto a velocidad y caudal de flujo en cada canal de cribado y sección de medición con la hélice H-4. La Tabla 10-7 presenta el resultado de la repartición de flujo en donde se observa una tendencia al flujo por el canal de cribado central, pero en menor porcentaje que para el caudal de operación bajo.

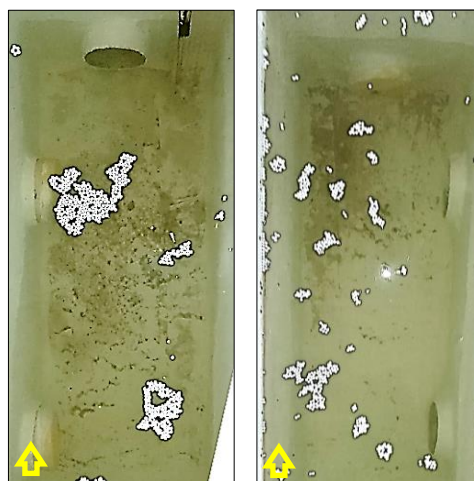
Tabla 10-7. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-4. Caudal Medio

%	IZQUIERDO	CENTRO	DERECHO
REJA	37%	39%	24%
CUCHARA	35%	41%	24%
PROMEDIO	36%	40%	24%

Se concluye que, para esta condición de operación, el canal central conduce la mayor cantidad de caudal con un estimativo de alrededor del 40% del caudal total de la Estación. De igual forma, el canal izquierdo conduciría aproximadamente el 36% del caudal, y el canal derecho el 24%.

10.2.3 Comportamiento de cárcamos de bombeo

Para esta condición de operación con caudal medio, se observó la superficie del agua con ondulaciones muy leves en los cárcamos de bombeo. La Figura 10-9 presenta los cárcamos izquierdo y derecho, con 1 y 2 bombas en funcionamiento respectivamente, donde se colocaron pequeñas esferas de poliestireno expandido. No se observaron rotaciones de estas partículas en la superficie.

**Figura 10-9. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Medio**

En cuanto a los canales de conexión, a simple vista se observó que, debido a la reducción gradual de velocidad en éstos, también experimentaban una reducción de oscilaciones y turbulencia en el flujo hasta llegar a la condición mencionada en los cárcamos de bombeo, (Figura 10-10). La Tabla 10-8 presenta los resultados obtenidos luego de la observación

de los cárcamos de la Estación. Se resalta que la variación en el nivel superficial resultó pequeña del orden de 5 mm y no se presentó ningún tipo de vorticidad superficial.



Figura 10-10. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Medio

Tabla 10-8. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Medio

CARACTERÍSTICA	MODELO	PROTOTIPO
Nivel cárcamo de bombeo	53.0 cm	730.3 cm
Variación del nivel	5 mm	69 mm
Profundidad zona de cribado	23.0 cm	316.9 cm
Vórtices superficiales	NO	NO

10.3 Caudal Medio Alto de operación

10.3.1 Generalidades

Para la condición de caudal medio alto fue posible observar a simple vista fenómenos turbulentos de mediana energía. Superficialmente, se notaron ondulaciones moderadas que fueron más notorias en la zona de cribado y de menor tamaño en los cárcamos de bombeo. Esta condición de operación contaba con todas las bombas en funcionamiento en el modelo. La Figura 10-11 muestra una toma general de la condición de flujo y operación en este caso, donde se observa las ondulaciones superficiales en los canales de cribado, y la turbulencia general en la Estación.

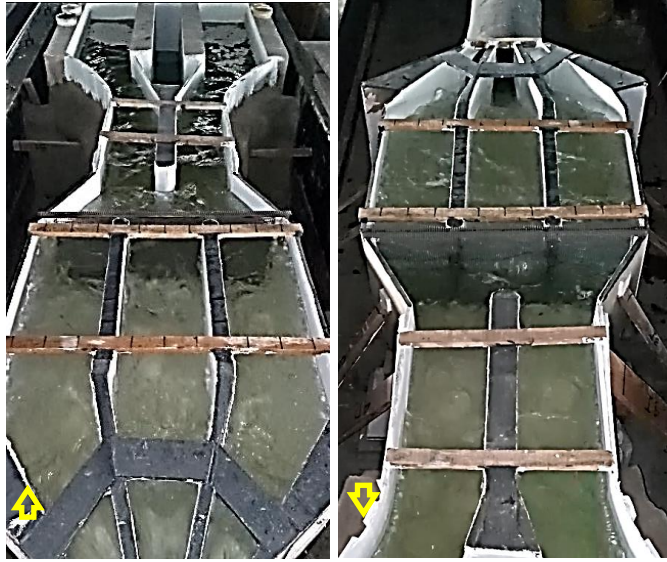


Figura 10-11. Ondulación superficial y vista general EEARC. Caudal Medio Alto

10.3.2 Repartición del flujo en canales de cribado

La Figura 10-12 muestra la zona de repartición del flujo entregado por el ITC, donde se nota un remanso notorio en el punto de división y un resalto hidráulico ahogado de mayor tamaño al inicio de la expansión de los muros deflectores. El flujo de ingreso es de alta velocidad, pero disminuye rápidamente en la transición de entrada.

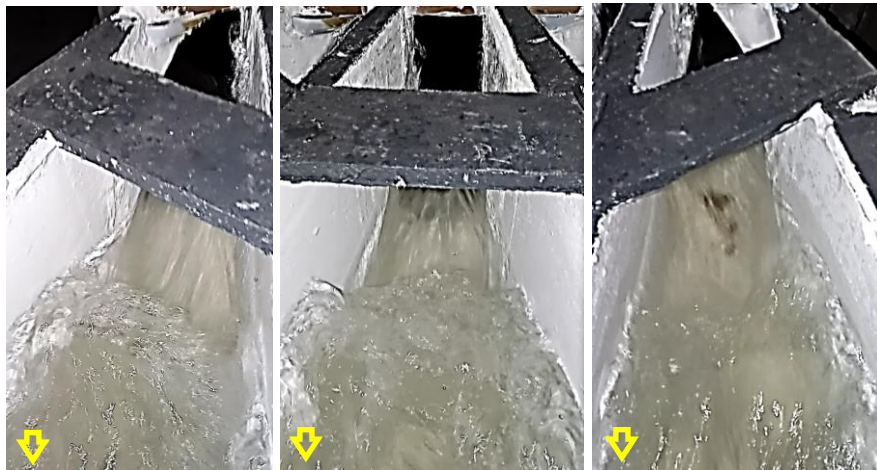


Figura 10-12. Entrega ITC a EEARC canales de cribado. Caudal Medio Alto

La Figura 10-8 muestra para comparación, la diferencia entre las ondulaciones superficiales y turbulencia de los canales central y laterales. En la imagen no se nota a

simple vista una ondulación superficial diferente entre los canales de cribado, sin embargo, se evidenció un resalto hidráulico central aparentemente un poco más energético comparado con aquellos laterales.

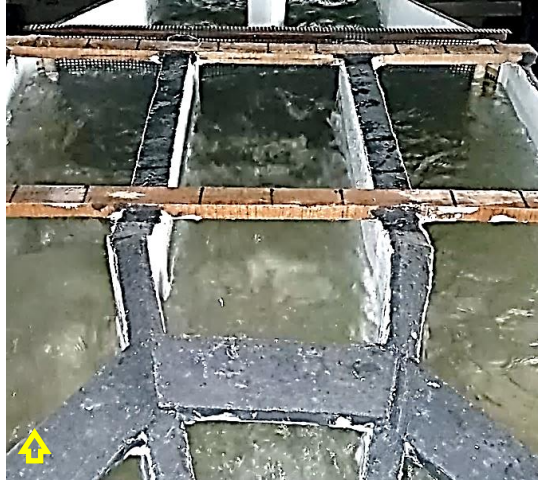


Figura 10-13. Ondulaciones y turbulencia en canales de cribado. Caudal Medio Alto

La toma de datos para este caudal, debido a sus altas velocidades, se hizo utilizando la hélice (H-4). Se buscó en el ensayo la condición de operación definida en la Tabla 9-2. Sin embargo, por limitaciones propias del laboratorio y regulación de caudal, las condiciones de operación alcanzadas se muestran en la Tabla 10-9.

Tabla 10-9. Condiciones de operación del Modelo Caudal Medio Alto.

Condición	Buscado	Hélice H-4
Caudal	45.4 l/s	45.7 l/s
Nivel canaleta Parshall	27.5 cm	27.6 cm
Nivel cárcamo bombeo (cm)	60.0 cm	61.0 cm
Número de bombas trabajando	6 bombas	6 bombas

Durante la experimentación, se notaron mayores velocidades hacia los costados externos de los canales laterales, y en general, para el canal central, se encontraron mayores velocidades hacia su costado izquierdo. La diferencia de velocidades en los canales laterales puede ser debida a la incidencia de la relación entre la velocidad angular y tangencial del flujo en estos cambios de dirección, y que generan menores velocidades en

los costados internos de las curvas, y mayores en los costados externos. La Tabla 10-10 presenta los resultados obtenidos en cuanto a velocidad y caudal de flujo en cada canal de cribado y sección de medición con la hélice H-4. La Tabla 10-11 presenta el resultado de repartición de flujo, de donde se observa una tendencia al flujo por el canal de cribado central, pero en menor porcentaje que para el caudal de operación medio.

Tabla 10-10. Resultados caudal y velocidad. Hélice H-4. Caudal Medio Alto.

SECCIÓN	MODELO (m/s)			PROTOTIPO (m/s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	0.193	0.222	0.161	0.716	0.824	0.599
CUCHARA	0.157	0.210	0.176	0.583	0.778	0.654

SECCIÓN	MODELO (l/s)			PROTOTIPO (m ³ /s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	15.44	17.77	12.92	10.88	12.53	9.11
CUCHARA	12.57	16.77	14.11	8.86	11.82	9.94

Tabla 10-11. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-4. Caudal Medio Alto.

%	IZQUIERDO	CENTRO	DERECHO
REJA	33%	39%	28%
CUCHARA	29%	39%	32%
PROMEDIO	31%	39%	30%

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que para esta condición de operación el canal central conduce la mayor cantidad de caudal con un estimativo de alrededor del 39% del caudal total de la Estación. De igual forma, el canal izquierdo conduciría entre el 29% y 33% del caudal, y el canal derecho entre el 28% y 32% del caudal.

10.3.3 Comportamiento de cárcamos de bombeo

Para esta condición de operación con caudal medio alto, se observó la superficie del agua con ondulaciones moderadas en los cárcamos de bombeo. La Figura 10-14 presenta los cárcamos izquierdo y derecho, con todas las bombas en funcionamiento, donde se colocaron pequeñas esferas de poliestireno expandido. Se observaron algunas rotaciones superficiales aisladas pero que no duraban más de un par de segundos. Como se nota en la imagen, todo el material flotante tuvo la tendencia de acumularse al final de los cárcamos producto del flujo.



Figura 10-14. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Medio Alto.

En cuanto a los canales de conexión, a simple vista se observó que, debido a la reducción gradual de velocidad en éstos, también experimentaban una reducción de oscilaciones y turbulencia en el flujo hasta llegar a la condición mencionada en los cárcamos de bombeo (Figura 10-15). La Tabla 10-12 presenta los resultados obtenidos luego de la observación de los cárcamos de bombeo de la Estación. Se resalta que la variación en el nivel superficial resultó moderada del orden de 10 mm y se presentó una vorticidad superficial leve y efímera. Los niveles y profundidades de lámina de agua medidos en el modelo se referenciaron al fondo local de la Estación.

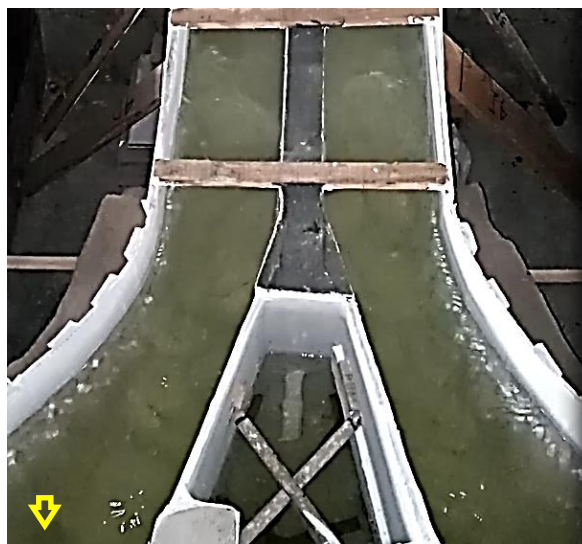


Figura 10-15. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Medio Alto

Tabla 10-12. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Medio Alto

CARACTERÍSTICA	MODELO	PROTOTIPO
Nivel cárcamo de bombeo	60.0 cm	730.3 cm
Variación del nivel	10 mm	138 mm
Profundidad zona de cribado	30.0 cm	316.9 cm
Vórtices superficiales	LEVES Y EFÍMEROS	LEVES Y EFÍMEROS

10.4 Caudal Máximo de operación

10.4.1 Generalidades

Para la condición de caudal medio alto fue posible observar a simple vista fenómenos turbulentos de alta energía. Superficialmente se notaron ondulaciones considerables en la zona de cribado y de menor tamaño en los cárcamos de bombeo. La Figura 10-16 muestra una toma general de la condición de flujo y operación en este caso, donde se observan las ondulaciones superficiales en los canales de cribado, y la turbulencia general aparente de la Estación.

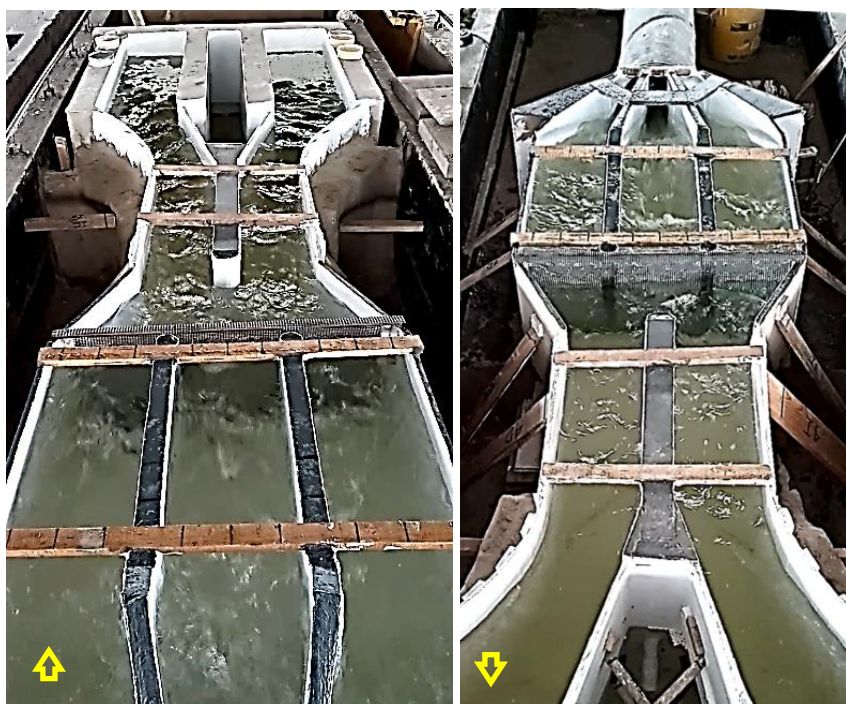


Figura 10-16. Ondulación superficial y vista general EEARC. Caudal Máximo

10.4.2 Repartición del flujo en canales de cribado

En la zona de repartición del flujo entregado por el ITC a la EEARC, se notó un remanso notorio en el punto de división y un resalto hidráulico ahogado de mayor tamaño al inicio de los canales de cribado. Como se observa en la Figura 10-17, en general se observó un flujo de ingreso de alta velocidad. La Figura 10-18 muestra para comparación, la diferencia aparente entre las ondulaciones superficiales y turbulencia de los canales central y laterales. En la imagen no se nota a simple vista una ondulación superficial diferente entre los canales de cribado, pero se recalca la alta turbulencia presente en esta zona.



Figura 10-17. Entrega ITC canales derecho, izquierdo y central. Caudal Máximo



Figura 10-18. Ondulaciones y turbulencia en canales central y laterales. Caudal Máximo

La toma de datos para este caudal, debido a sus altas velocidades esperadas, se hizo utilizando la hélice de sensibilidad media (H-4). Durante la sesión experimental, se buscó la condición de operación definida en la Tabla 9-2. Sin embargo, por limitaciones propias del laboratorio y regulación de caudal, las condiciones de operación alcanzadas se muestran en la Tabla 10-13.

Tabla 10-13. Condiciones de operación del modelo Caudal Máximo.

CONDICIÓN	BUSCADO	HÉLICE H-4
Caudal	51.4 l/s	51.5 l/s
Nivel canaleta Parshall	29.9 cm	30.0 cm
Nivel cárcamo bombeo	62.0 cm	63.0 cm
Número de bombas trabajando	6 bombas	6 bombas

Durante la experimentación, se notaron mayores velocidades hacia los costados externos de los canales laterales, y en general, para el canal central, se encontraron mayores velocidades hacia su costado izquierdo. Como ya se ha comentado, esto puede ser debido a estos cambios de dirección, que generan menores velocidades en los costados internos de las curvas, y mayores en los costados externos.

La Tabla 10-14 presenta los resultados obtenidos en cuanto a velocidad y caudal de flujo en cada canal de cribado y sección de medición con la hélice H-4. La Tabla 10-15 presenta el resultado de repartición de flujo, de donde se observa una tendencia al flujo por el canal de cribado central, pero en menor porcentaje que para el caudal de operación medio alto.

Tabla 10-14. Resultados obtenidos de caudal y velocidad. Hélice H-4. Caudal Máximo

SECCIÓN	MODELO (m/s)			PROTOTIPO (m/s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	0.212	0.240	0.179	0.788	0.890	0.666
CUCHARA	0.192	0.234	0.229	0.711	0.868	0.850

SECCIÓN	MODELO (l/s)			PROTOTIPO (m ³ /s)		
	IZQ	CEN	DER	IZQ	CEN	DER
REJA	17.53	19.79	14.81	12.35	13.95	10.44
CUCHARA	15.82	19.31	18.90	11.15	13.61	13.32

Tabla 10-15. Resultado de repartición de flujo. Hélice H-4. Caudal Máximo

%	IZQUIERDO	CENTRO	DERECHO
REJA	34%	38%	28%
CUCHARA	29%	36%	35%
PROMEDIO	31%	37%	32%

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que para esta condición de operación el canal central conduce la mayor cantidad de caudal con un estimativo de alrededor del

37% del caudal total de la Estación. De igual forma, el canal izquierdo conduciría entre el 29% y 34% del caudal, y el canal derecho entre el 28% y el 35%.

10.4.3 Comportamiento de cárcamos de bombeo

Para esta condición de operación con caudal máximo, se observó la superficie del agua con ondulaciones moderadas en los cárcamos de bombeo. La Figura 10-19 presenta los cárcamos izquierdo y derecho, con todas las bombas en funcionamiento, donde se colocaron pequeñas esferas de poliestireno expandido. Para este caso se observó algunas rotaciones superficiales aisladas que permanecieron continuamente en el tiempo de ensayo.

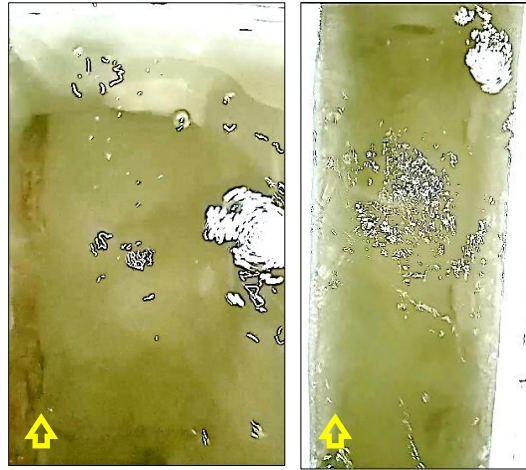


Figura 10-19. Comportamiento general cárcamos de bombeo. Caudal Máximo

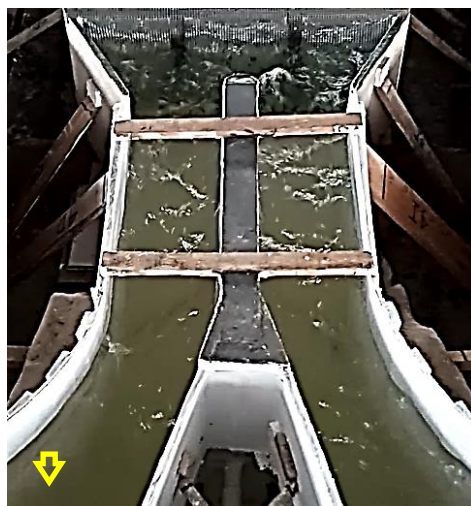


Figura 10-20. Comportamiento general canales de conexión. Caudal Máximo

En los canales se conexión, se observó que, debido a la reducción gradual de velocidad, también experimentaban una reducción de oscilaciones y turbulencia en el flujo hasta llegar a los cárcamos de bombeo, (Figura 10-20). La Tabla 10-16 presenta los resultados obtenidos en el modelo. Se resalta que la fluctuación de superficie fue moderada, del orden de 15 mm y se presentó vorticidad superficial continua. Los niveles y profundidades de lámina de agua medidos en el modelo se referenciaron al fondo local de la Estación.

Tabla 10-16. Comportamiento hidráulico de cárcamos de bombeo. Caudal Máximo

Característica	Modelo	Prototipo
Nivel Cárcamo de bombeo	63.0 cm	868.1 cm
Variación del Nivel	15 mm	207 mm
Profundidad zona de Cribado	33.0 cm	454.7 cm
Vórtices superficiales	LEVES Y CONSTANTES	LEVES Y CONSTANTES

11. Modelación del transporte y exclusión de sedimentos

La modelación realizada con sedimentos consideró dos tasas de abastecimiento diferentes, como se comentó en la sección del Programa Experimental. Cada abastecimiento se determinó utilizando el material con la gradación granulométrica escogida, variando el volumen de material suministrado durante el tiempo de ensayo. Como se presentó en la Tabla 9-3, las cargas sedimentológicas representan condiciones climáticas diferentes: una para clima húmedo normal de 20 m³/día en el prototipo, y otra para clima húmedo normal máximo de 284 m³/día en el prototipo, ambos valores tomados de los estudios realizados para el diseño detallado de la Estación.

La investigación evaluó la respuesta de la Estación frente a estas dos condiciones de carga, bajo los distintos caudales de operación estudiados, a excepción del caudal bajo, que únicamente se evaluó con abastecimiento medio debido a su baja capacidad de transporte, y a la baja incidencia de caudales de escorrentía pluvial en estas condiciones. La carga de sedimentos o caudal sólido se manejó en unidades de kg/hora, y se tomó una densidad de depósito del material granular no consolidado de 1.5 ton/m³. En cada una de las imágenes de este capítulo se presenta la dirección del flujo con una **flecha amarilla** para dar mayor claridad al lector.

11.1 Caudal Bajo de operación

11.1.1 Respuesta ante Carga Media de sedimentos

La Tabla 11-1 presenta las condiciones de operación buscadas y alcanzadas finalmente por el modelo luego de un tiempo suficientemente largo de estabilización. De esta se observa que, debido a la condición de depositación encontrada en el ITC, el valor de tasa de abastecimiento neto de sedimentos a la entrada a la Estación, alcanzada en el tiempo de experimentación tuvo un valor de 8.4 kg/hora o 5.6 l/hora, lo que representó una escala

de tiempo sedimentológica t_{sr} de 17.6, es decir, 1 hora en el modelo equivale a 17.6 horas en el prototipo. Esto implica que la experimentación, que tuvo una duración de 117 minutos, cubrió más de un día de respuesta de la EEARC en operación real.

Tabla 11-1. Condiciones de operación del modelo. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	7.6 cm	11.9 cm
Caudal	7.1 l/s	13.6 l/s
Nivel cárcamo bombeo	49.6 cm	51.5 cm
Sedimento total ingresado al modelo	36.0 kg	27.0 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	36.0 kg	16.3 kg
Tiempo de ensayo	120.0 min	117.0 min
Tasa de abastecimiento neto	18.0 kg/h	8.4 kg/h
Escala t_{sr}	37.5	17.6
Número de bombas en operación	2	2

En este experimento se corrigió la condición de caudal de salida, utilizando dos tuberías una en cada cárcamo de bombeo; durante el ensayo, debido a la baja capacidad de transporte de este caudal, se presentó en el ITC deposición de material. La Figura 11-1 muestra la acumulación de material en la tubería luego del ensayo. Se nota de igual manera que el flujo dentro del tubo presenta una turbulencia baja.



Figura 11-1. Deposición en el fondo del ITC. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

Se evidenció en la zona de la cuchara bivalva, la presencia de contraflujos y vórtices superficiales en los canales laterales, y en menor medida en el canal central. Como se muestra en la Figura 11-2, luego del ensayo se observaron depósitos en los tres canales de cribado, pero con predominancia en el canal central. En los canales laterales se observó poco movimiento superficial de lámina de agua. La Figura 11-3 muestra a la izquierda los depósitos observados luego de la reja de cribado, los cuales cubrieron toda el área, además, se presenta sedimentación en cercanías a los excluidores, donde se notaron zonas libres de sedimentos en el punto de succión.

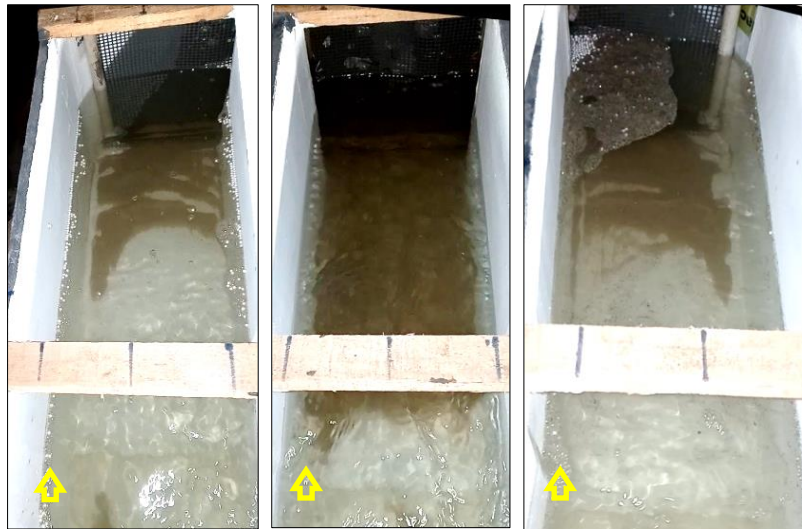


Figura 11-2. Depósitos en los canales de cribado. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio



Figura 11-3. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

En los cárcamos de bombeo, se observó una leve depositación del material más fino en el fondo. La Figura 11-4 muestra la barra de sedimentos formada por el material granular derivado por los excluidores de sedimentos y la Figura 11-5 presenta de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación.



Figura 11-4. Sedimentos excluidos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

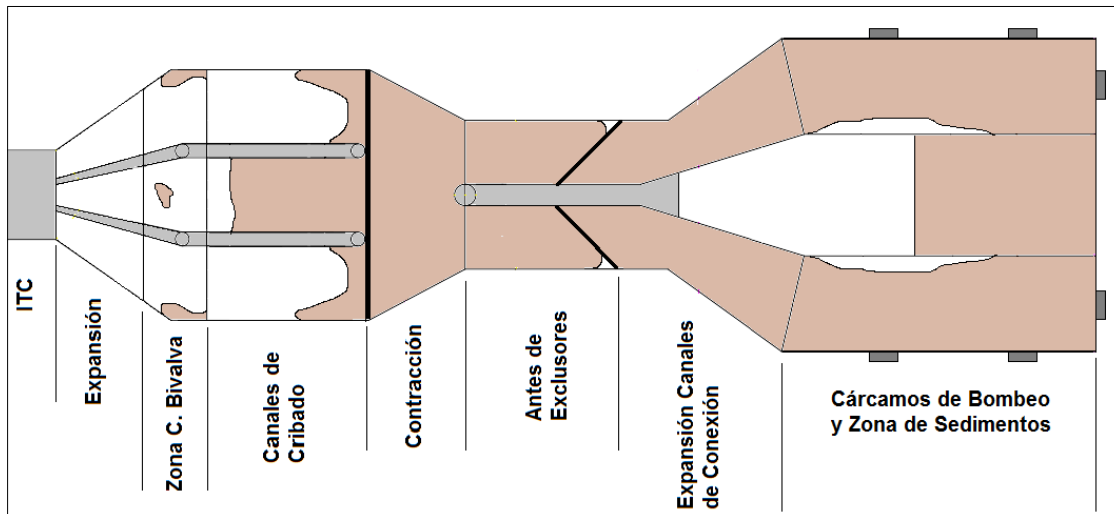


Figura 11-5. Esquema de depositación en planta. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

En el ITC se evidenció la formación de un depósito de sedimentos. En la entrada en expansión no se dio acumulación de material, pero en la zona de la cuchara bivalva se

formaron depósitos hacia los costados y en menor medida en el sector central. En los canales de cribado se dio una mayor sedimentación en el canal central, posiblemente por el paso de mayor caudal. En el resto de la Estación se dio una depositación generalizada como se muestra en el esquema de la imagen. El espesor de los depósitos en el fondo de la EEARC no superó los 10 mm, o 13.8 cm prototipo, valor máximo localizado en el canal de cribado central.

La eficiencia del sistema de excluidores de sedimentos fue estimada a partir de la relación entre los porcentajes de la carga o caudal sólido ($Q_s\%$) excluido y el caudal líquido ($Q_l\%$) derivado como se presentó en la investigación de Ordoñez y otros (2008) en la Figura 2-10 y Figura 2-12. Esto, debido a que la exclusión de sedimentos está estrechamente relacionada con el caudal líquido derivado por los excluidores, donde se busca maximizar la extracción de material minimizando la extracción de flujo de agua.

Tabla 11-2. Transporte y exclusión de sedimentos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de ensayo	117.0 min
2	Caudal	13.6 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	27.0 kg
4	Tasa de abastecimiento total	13.8 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	10.7 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	16.3 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	8.4 kg/h
8	Sedimentos excluidos	6.7 kg
9	Depósitos en la Estación	5.8 kg
10	Sedimentos bombeados (estimados)	3.9 kg
11	Caudal sólido excluido	3.4 kg/h
		40.8 %
12	Caudal líquido excluido	3.18 l/s
		23.4 %
13	Eficiencia de exclusión ($Q_s\%/Q_l\%$)	1.7

En la Tabla 11-2, las cantidades totales de sedimento utilizados en la experimentación y depositados en el modelo se expresaron como peso seco. Las filas 3 y 4 presentan respectivamente el sedimento y tasa de abastecimiento total utilizado en el ensayo y que ingresó por el ITC. La fila 5 muestra la cantidad encontrada de sedimentos remanentes en

el ITC y que no ingresaron a la Estación en el tiempo de ensayo. Las filas 6 y 7 presentan el sedimento y tasa de abastecimiento neto de entrada a la Estación luego de descontar aquel remanente en el ITC. Las filas 8 y 9 muestran respectivamente la cantidad de material encontrado en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y en el fondo de la Estación. En la fila 10 se estima la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de excluidores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema propuesto de excluidores se calcula como la relación entre los porcentajes de caudal líquido y sólido derivado durante el ensayo, en la fila 13.

La Tabla 11-3 presenta el resultado de algunas mediciones realizadas en el modelo y su valor homólogo en el prototipo. Todos los niveles están referenciados al fondo local del modelo. Se presenta una estimación del espesor y volumen del depósito de sedimentos en la zona de exclusión, y el máximo espesor de los depósitos de fondo de la Estación. Para el caso de este caudal de operación y condición de abastecimiento de sedimentos, el espesor máximo de depósitos de fondo se encontró en el canal de cribado central posiblemente debido a su caudal de paso predominante.

Tabla 11-3. Medición de niveles y espesores. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

PARÁMETRO	MODELO	PROTOTIPO
Tiempo transcurrido	1.95 horas	34.1 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	51.5 cm	709.7 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	20.5 cm	282.5 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	23.0 cm	316.9 cm
Volumen depósito exclusión	4.4 l	11.6 m ³
Espesor depósito exclusión	1.07 cm	14.7 cm
Máximo espesor depósitos de fondo	1.0 cm	13.8 cm

A continuación se presentan las granulometrías encontradas de los depósitos de sedimentos en el modelo (Tabla 11-4 y Figura 11-6). En general se estudiaron y diferenciaron los sedimentos derivados por los excluidores, los depositados en el ITC y los depositados en el fondo de la Estación, a la vez que se hizo una comparación con la granulometría original. Es evidente a partir de la Figura 11-6, que los sedimentos más finos fueron eliminados por la succión de las bombas de la Estación durante el ensayo.

Para esta condición de operación y abastecimiento se encontró en el fondo del modelo un rango de diámetros principalmente entre 0.2 mm y 0.6 mm lo que representa en el prototipo tamaños entre 0.3 mm y 7 mm. De igual manera, se observó que todos los materiales por encima de 0.7 mm en el modelo, o sea mayores de 7 mm en el prototipo son en su mayor parte derivados por los excluidores, y una menor proporción permanece en la zona de la cuchara bivalva, y en los pozos de cribado y bombeo.

Tabla 11-4. Granulometrías de los depósitos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

Abertura tamiz (mm)	% Pasa			
	Original	Exclusión	ITC	Fondo
5.00	99.8	100.0	100.0	100.0
4.00	99.4	99.8	99.7	99.9
3.15	98.4	98.8	98.1	99.7
2.00	95.6	95.9	93.4	99.4
1.00	83.6	79.8	74.2	97.6
0.63	77.2	70.7	62.9	95.0
0.40	64.9	35.0	29.6	67.8
0.25	27.9	4.9	3.0	8.3
0.16	6.7	1.8	0.6	1.7
Fondo	0.0	0.0	0.0	0.1

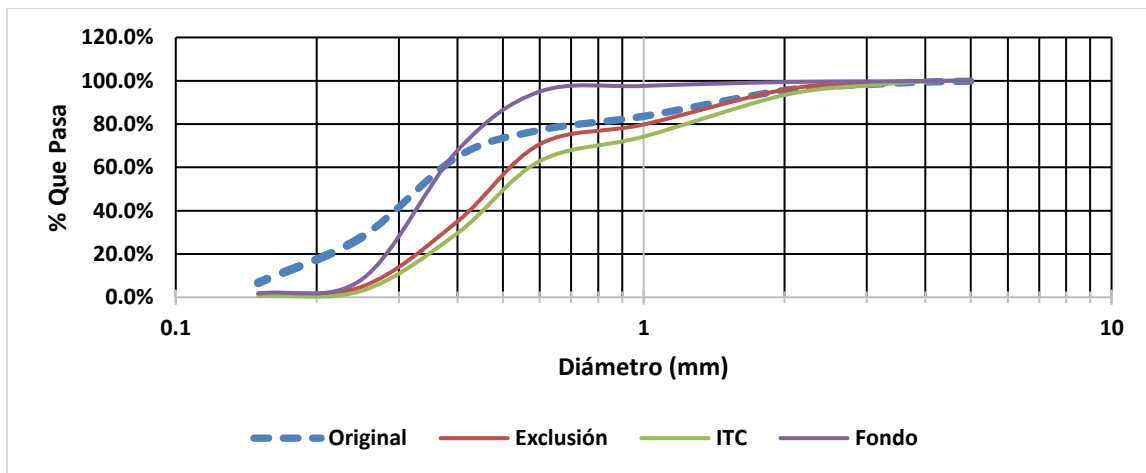


Figura 11-6. Granulometrías de los depósitos. Caudal Bajo y Abastecimiento Medio

11.2 Caudal Medio de operación

11.2.1 Respuesta ante Carga Media de sedimentos

La Tabla 11-5 presenta las condiciones de operación buscadas y alcanzadas finalmente en el modelo luego de un tiempo suficientemente largo de estabilización. De esta se observa que el valor de la carga sedimentológica promedio alcanzada en el tiempo de experimentación fue de 17.2 kg/hora u 11.5 l/hora, lo que representó una escala de tiempo sedimentológica t_{sr} de 36, es decir, 1 hora en el modelo equivale a 36 horas en el prototipo. El ensayo tuvo una duración de 60 minutos, o 1.5 días en el prototipo.

Tabla 11-5. Condiciones de operación del modelo. Caudal Medio y Abastecimiento Medio

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	17.0 cm	17.5 cm
Caudal	22.7 l/s	23.7 l/s
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	53.3 cm	53.0 cm
Sedimento total ingresado al modelo	18.0 kg	17.2 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	18.0 kg	17.2 kg
Tiempo de ensayo	60.0 min	60.0 min
Tasa de abastecimiento neto	18.0 kg/h	17.2 kg/h
Escala t_{sr}	37.5	36.0
Número de bombas en operación	3	3



Figura 11-7. Leve depósito en el ITC (izq.) y en zona centro de entrada (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Medio

Como se observa a la izquierda de la Figura 11-7, se presentó en el ITC una depositación muy leve de material, la cual no fue considerada debido a su dificultad de recolección y a que representó una cantidad muy baja y despreciable para el ensayo. De igual manera, el flujo dentro del tubo presentó una turbulencia moderada. Luego del ensayo, como se muestra en la Figura 11-8, se observaron depósitos de sedimentos en los tres canales de cribado, pero algo mayores en el canal central. Por su parte, la Figura 11-9 muestra a la izquierda los depósitos observados luego de la reja de cribado, los cuales se distribuyeron con pequeñas barras, además, a la derecha, se presenta la sedimentación en cercanías a los excluidores.

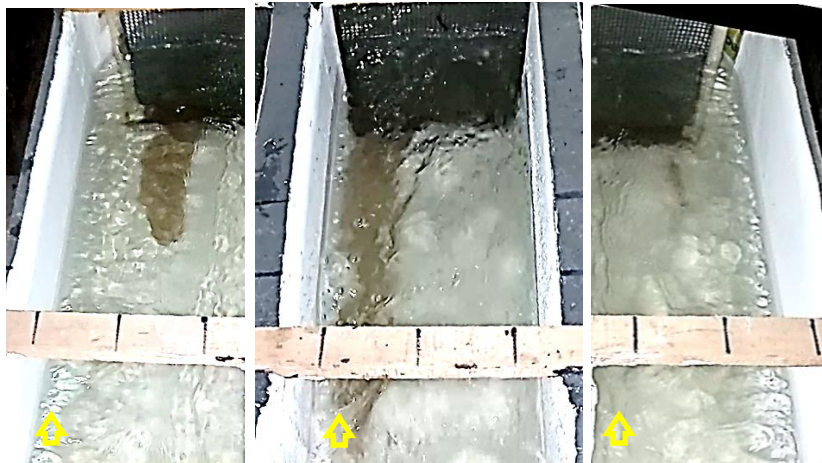


Figura 11-8. Depósitos en los canales de cribado. Caudal Medio y Abastecimiento Medio



Figura 11-9. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Medio

La Figura 11-10 muestra a la izquierda, para luego del ensayo, la barra de sedimentos formada por el material granular derivado por los excluidores de sedimentos, y a la derecha, el resultado alcanzado en los cárcamos de bombeo. Debido a la poca visibilidad del agua en estas zonas, las fotografías se tomaron luego de drenar muy lentamente el agua del modelo. Se observó una ligera depositación del material más fino en el fondo. La Figura 11-11 muestra de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación.

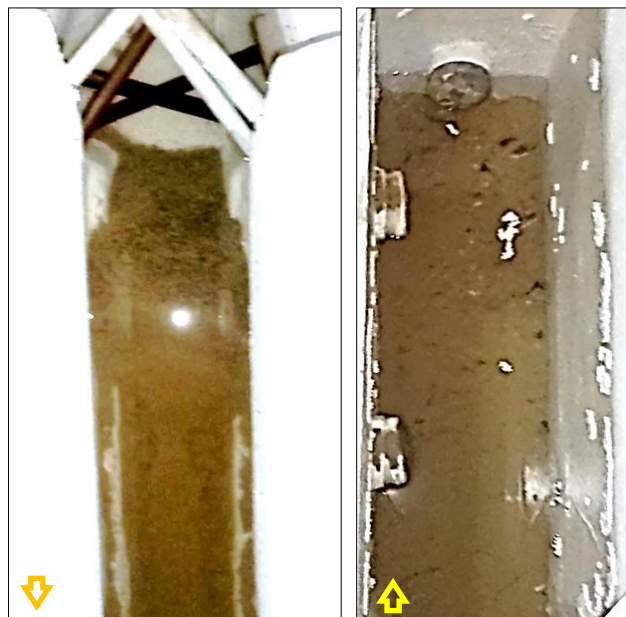


Figura 11-10. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Medio

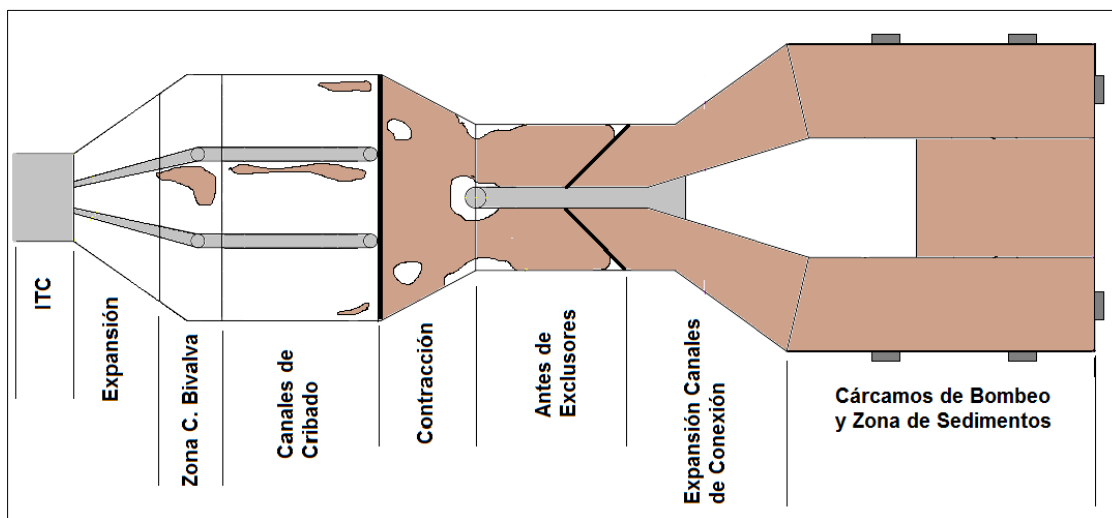


Figura 11-11. Esquema de depositación en planta. Caudal Medio y Abastecimiento Medio

No hubo depósitos en la rampa en expansión, pero si en la zona de la cuchara bivalva cerca del centro. En los canales de cribado, hubo mayor sedimentación en el canal central, posiblemente debido al mayor caudal. En el resto de la Estación hubo depositación generalizada como se muestra en el esquema de la Figura 11-11. El espesor de los depósitos no superó los 20 mm, (28 cm en el prototipo), aguas abajo de la reja de cribado antes de los canales de conexión en el sector central. La eficiencia del sistema de excluidores en este ensayo fue estimada nuevamente por el porcentaje de material extraído y por la relación de exclusión.

Tabla 11-6. Transporte y exclusión de sedimentos. Caudal Medio y Abastecimiento Medio

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de ensayo	60.0 min
2	Caudal	23.7 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	17.2 kg
4	Tasa de abastecimiento total	17.2 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	0.0 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	17.2 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	17.2 kg/h
8	Sedimentos excluidos	9.0 kg
9	Depósitos en la Estación	4.6 kg
10	Sedimentos bombeados (estimados)	3.7 kg
11	Caudal sólido excluido	9.0 kg/h
		52.0 %
12	Caudal líquido excluido	2.5 l/s
		10.6 %
13	Eficiencia de exclusión ($Q_s\%/Q_l\%$)	4.9

En la Tabla 11-6, las cantidades totales de sedimento utilizados en la experimentación y depositados en el modelo se expresaron como peso seco. Las filas 3 y 4 presentan respectivamente el sedimento y tasa de abastecimiento total utilizado en el ensayo y que ingresó por el ITC. La fila 5 muestra la cantidad encontrada de sedimentos remanentes en el ITC y que no ingresaron a la Estación en el tiempo de ensayo. Las filas 6 y 7 presentan el sedimento y abastecimiento neto de entrada a la Estación luego de descontar aquel remanente en el ITC. Las filas 8 y 9 muestran respectivamente la cantidad de material encontrado en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y en el fondo de la Estación. La fila 10 presenta el estimativo de la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de excluidores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal

líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema de excluidores se calcula como la relación entre los porcentajes de caudal líquido y sólido derivado durante el ensayo, en la fila 13.

Tabla 11-7. Medición de niveles y espesores. Caudal Medio y Abastecimiento Medio.

PARÁMETRO	MODELO	PROTOTIPO
Tiempo transcurrido	1.0 horas	36.0 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	53.0 cm	730.3 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	22.5 cm	310.1 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	36.0 cm	496.1 cm
Volumen depósito exclusión	6.0 l	15.7 m ³
Espesor depósito exclusión	1.5 cm	20.7 cm
Máximo espesor depósitos de fondo	2.0 cm	27.6 cm

La Tabla 11-7 presenta el resultado de algunas mediciones geométricas de interés realizadas en el modelo y su valor correspondiente en el prototipo. Se resalta que todos los valores de nivel de lámina de agua están referenciados sobre al fondo local del modelo. Adicionalmente, se presenta una estimación del espesor del depósito de material granular en la zona de sedimentos para contener el volumen de sedimentos excluidos.

Tabla 11-8. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Medio

Abertura Tamiz	% Pasa		
	Original	Exclusión	Fondo
mm			
5.00	99.8%	100.0%	100.0%
4.00	99.4%	99.8%	100.0%
3.15	98.4%	98.5%	99.8%
2.00	95.6%	93.8%	99.2%
1.00	83.6%	76.3%	96.2%
0.63	77.2%	67.2%	94.3%
0.40	64.9%	43.4%	87.7%
0.25	27.9%	9.1%	32.5%
0.16	6.7%	0.9%	5.6%
Fondo	0.0%	0.0%	0.0%

En la Tabla 11-8 y la Figura 11-12 se presentan las granulometrías encontradas en los depósitos del modelo. Se observa que, la exclusión de partículas finas, menores de 0.25mm en el modelo, o menores de 1 mm en el prototipo es muy baja, y prácticamente

todo este material es bombeado hacia la PTAR, o permanece en alguna proporción en los materiales depositados en los canales de cribado y los cárcamos de bombeo. El sedimento eliminado por los excluidores está en el rango entre 0.2 mm a 3,5 mm, o sea entre 0.7 mm y 5.0 cm en el prototipo. Las partículas bombeadas y expulsadas de la EEARC representaron los tamaños finos ya considerados, más una proporción muy pequeña de arena gruesa, entre 1 y 2 mm y otra menor de los tamaños medios de grava, hasta de 2 cm.

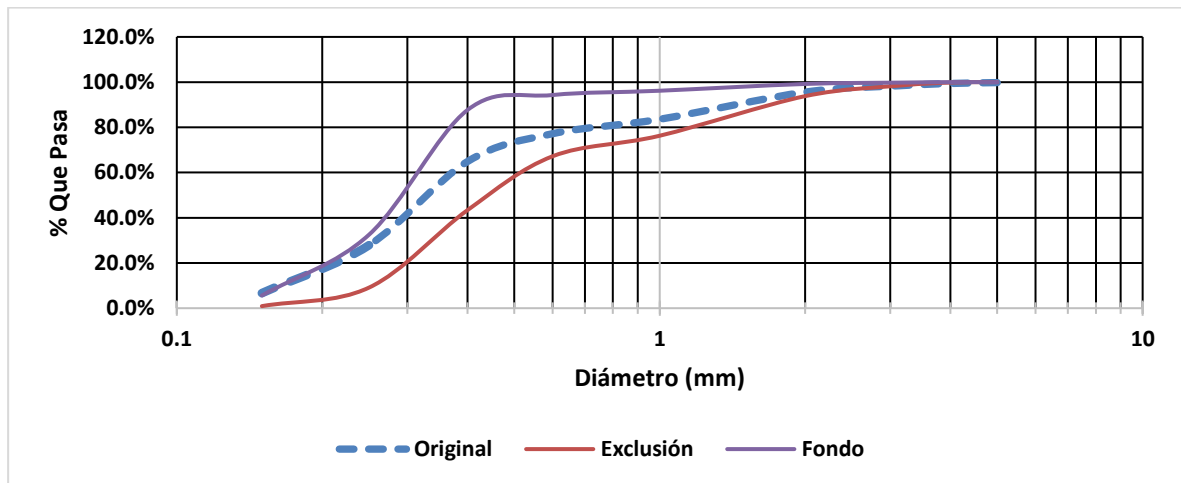


Figura 11-12. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Medio.

Lo anterior significa que, para el caudal medio de la Estación, con la carga media predominante en el sistema de drenaje, los excluidores reducen el riesgo de mantenimiento de las bombas en una proporción muy alta, y también ayudan a mantener limpios de sedimentos los canales principales de la Estación, conduciéndolos a un sitio del cual resulta mucho más fácil removerlos sin ocasionar cierres parciales o totales de operación.

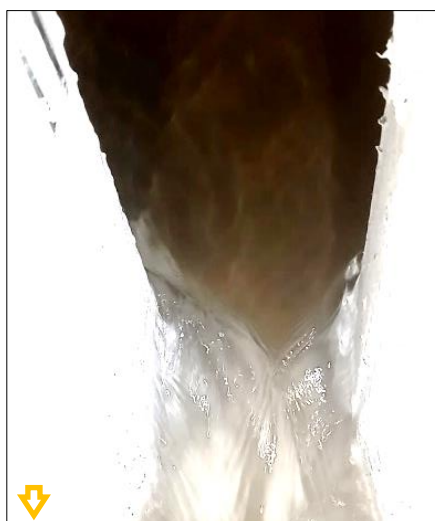
11.2.2 Respuesta ante Carga Alta de sedimentos

La Tabla 11-9 presenta las condiciones de operación buscadas y alcanzadas finalmente por el modelo luego de un tiempo suficientemente largo de estabilización. De esta se observa que el valor de carga sedimentológica promedio alcanzada en el tiempo de experimentación fue de 36.0 kg/hora o 24.0 l/hora, lo que representó una escala de tiempo sedimentológica t_{sr} de 5.3, es decir, 1 hora en el modelo equivale a 5.3 horas en el prototipo. Esto implica que la experimentación, que tuvo una duración de 122 minutos, representa un poco menos de medio día de operación en el prototipo.

Tabla 11-9. Condiciones de operación de la Estación. Caudal Medio y Abastecimiento Alto

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	17.0 cm	16.7 cm
Caudal	22.7 l/s	22.1 l/s
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	53.3 cm	53.5 cm
Sedimento total ingresado al modelo	76.0 kg	80.0 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	76.0 kg	73.3 kg
Tiempo de ensayo	120.0 min	122.0 min
Tasa de abastecimiento neto	38.0 kg/h	36.0 kg/h
Escala t_{sr}	5.6	5.3
Número de bombas en operación	3	3

Durante el ensayo y debido a la capacidad de transporte de este caudal, se presentó en el ITC una depositación considerable de material. La Figura 11-13 muestra la formación del depósito de material en la tubería luego del ensayo, donde se observaron sedimentos en continuo arrastre hacia la zona central de la cuchara bivalva.

**Figura 11-13. Deposición en el fondo del ITC. Caudal Medio y Abastecimiento Alto**

Como se muestra en la Figura 11-14, se observaron depósitos considerables en los tres canales de cribado, pero con predominancia en el canal central. La Figura 11-15 muestra a la izquierda los depósitos observados luego de la reja de cribado, los cuales se distribuyeron en toda la zona, presentando espesores importantes. A la derecha de la imagen se observa la depositación en cercanías a los excluidores a 45°.



Figura 11-14. Depósito en los canales de cribado. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.



Figura 11-15. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Alto.

La Figura 11-16 muestra a la izquierda, la barra de sedimentos formada por el material granular derivado por los excluidores de sedimentos, y a la derecha, el resultado alcanzado en los cárcamos de bombeo, al concluir el ensayo. La Figura 11-17 presenta de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación. En el ITC se evidenció la formación de depósito de material, a la entrada en expansión no se dio acumulación de material, pero en la zona de la cuchara bivalva hubo sedimentación en la zona central.

En cuanto a los canales de cribado se dio una sedimentación con espesor considerable (Tabla 11-11), pero con predominancia en el canal central. En el resto de la Estación se dio una depositación generalizada como se muestra en el esquema de la Figura 11-17, con altos espesores de depósito. Estos espesores de material sedimentado en el fondo del modelo alcanzaron valores hasta de 12 cm o de 1.65 m en el prototipo, específicamente aguas abajo de la reja de cribado antes de los canales de conexión.



Figura 11-16. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio y Abastecimiento Alto.

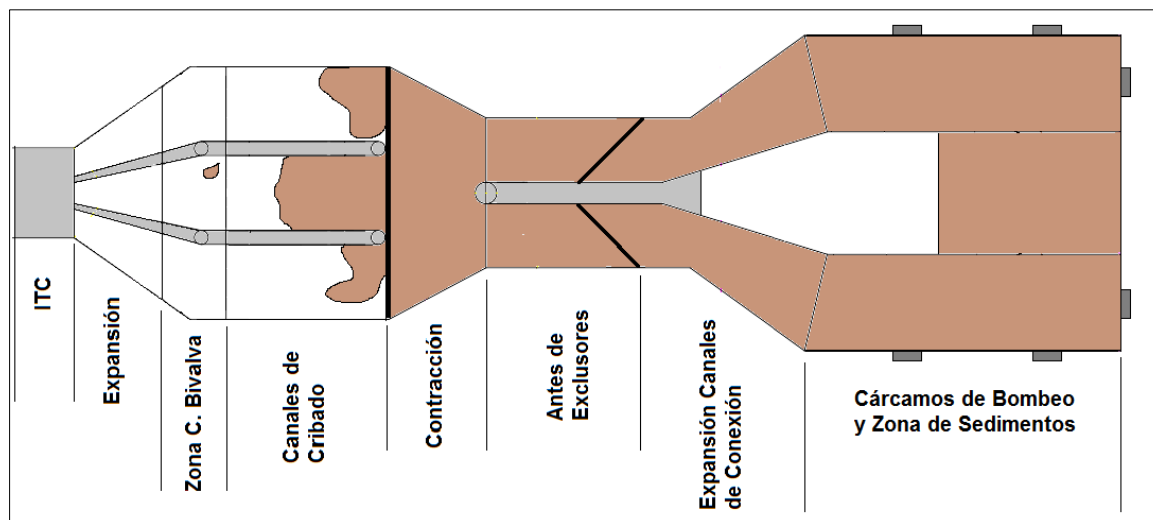


Figura 11-17. Esquema de depositación en planta. Caudal Medio y Abastecimiento Alto

En la Tabla 11-10, las cantidades totales de sedimento utilizados en la experimentación y depositados en el modelo se expresaron como peso seco. Las filas 3 y 4 presentan respectivamente el sedimento y tasa de abastecimiento total utilizado en el ensayo y que ingresó por el ITC. La fila 5 muestra la cantidad encontrada de sedimentos remanentes en el ITC y que no ingresaron a la Estación en el tiempo de ensayo. Las filas 6 y 7 presentan el sedimento y tasa de abastecimiento neto de entrada a la Estación luego de descontar

aquel remanente en el ITC. Las filas 8 y 9 muestran respectivamente la cantidad de material encontrado en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y al fondo de la Estación. La fila 10 presenta la estimación de la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de excluidores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema propuesto de excluidores para este caso se calcula por la relación de derivación, en la fila 13.

Tabla 11-10. Transporte y exclusión de sedimentos. Caudal Medio y Abastecimiento Alto

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de Ensayo	122.0 min
2	Caudal	22.1 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	80.0 kg
4	Tasa de abastecimiento total	39.3 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	6.7 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	73.3 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	36.0 kg/h
8	Sedimentos excluidos	24.1 kg
9	Depósitos en la Estación	40.6 kg
10	Sedimentos Bombeados (Estimados)	8.6 kg
11	Caudal sólido excluido	11.9 kg/h
		32.9 %
12	Caudal líquido excluido	2.4 l/s
		10.7 %
13	Eficiencia de exclusión ($Q_s\%/Q_l\%$)	3.1

Tabla 11-11. Mediciones de niveles y espesores. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.

PARÁMETRO	MODELO	PROTOTIPO
Tiempo transcurrido	2.0 horas	59.2 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	53.5 cm	737.2 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	22.5 cm	310.1 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	38.2 cm	526.4 cm
Volumen depósito exclusión	16.0 l	42.0 m ³
Espesor depósito exclusión	3.9 cm	53.3 cm
Espesor depósito cribado centro	11.0 cm	151.6 cm
Espesor depósito cribado lateral	3.0 cm	41.3 cm
Espesor depósito reja centro	12.0 cm	165.4 cm
Espesor depósito reja lateral	8.0 cm	110.2 cm

La Tabla 11-11 presenta el resultado de algunas mediciones realizadas en el modelo y su valor en el prototipo. Todos los valores de nivel están referenciados al fondo local del modelo. Se incluye el estimativo del espesor del depósito en la zona de exclusión y varias mediciones en la zona de cribado debido a la considerable cantidad de sedimentos depositados.

Tabla 11-12. Granulometrías de depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.

Abertura Tamiz	% Pasa			
	Original	Exclusión	ITC	Fondo
mm				
5.00	99.8%	100.0%	100.0%	100.0%
4.00	99.4%	99.4%	99.8%	100.0%
3.15	98.4%	97.2%	98.7%	99.7%
2.00	95.6%	91.5%	96.2%	99.2%
1.00	83.6%	66.5%	77.4%	95.7%
0.63	77.2%	55.9%	64.8%	91.0%
0.40	64.9%	36.7%	33.8%	70.7%
0.25	27.9%	4.4%	9.7%	9.9%
0.16	6.7%	0.9%	1.5%	1.9%
Fondo	0.0%	0.0%	10.0%	0.0%

En la Tabla 11-12 y Figura 11-18 se presentan las granulometrías encontradas en los depósitos del modelo. Se observa que las partículas bombeadas y expulsadas de la EEARC corresponden a los sedimentos más finos, y el material derivado por los excluidores al más grueso; una fracción del material con diámetro de alrededor de 0.2 mm e inferior fue bombeada casi en su totalidad.

La exclusión de partículas finas, menores de 0.2 mm en el modelo, o menores de 1 mm en el prototipo es mínima, y casi todo el material que entra es bombeado hacia la PTAR, o permanece en los materiales depositados en los canales de cribado y los cárcamos de bombeo. El material excluido está en el rango de 0.2 mm a 3.5 mm, o entre 0.7 mm y 5.0 cm en el prototipo. Las partículas bombeadas por la EEARC son los finos ya considerados, más una proporción muy pequeña de material grueso. El mayor problema consiste en la gran cantidad de material que permanece en los canales de la Estación, generando la necesidad de mantenimiento a causa del considerable espesor de los depósitos.

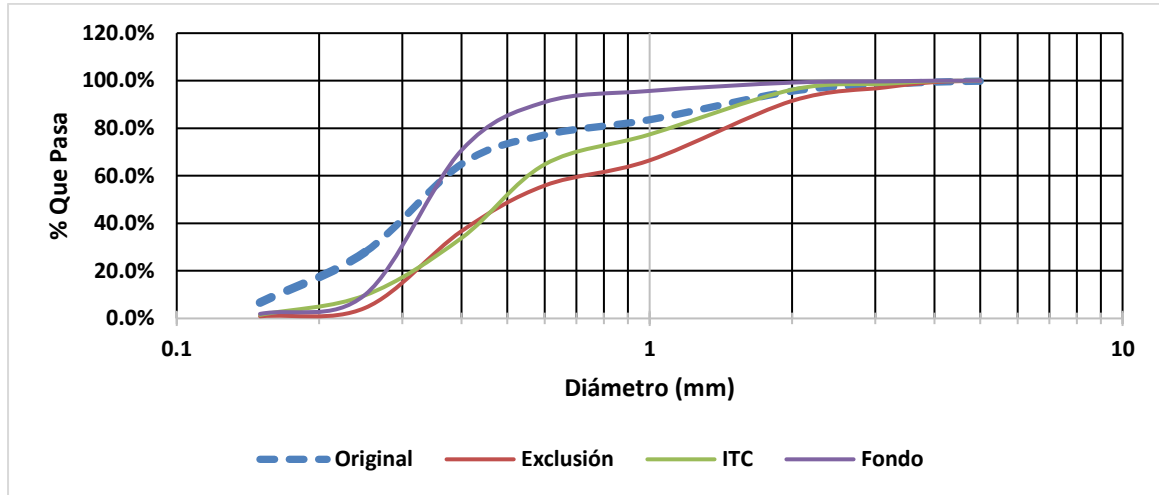


Figura 11-18. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio y Abastecimiento Alto.

11.3 Caudal Medio Alto de operación

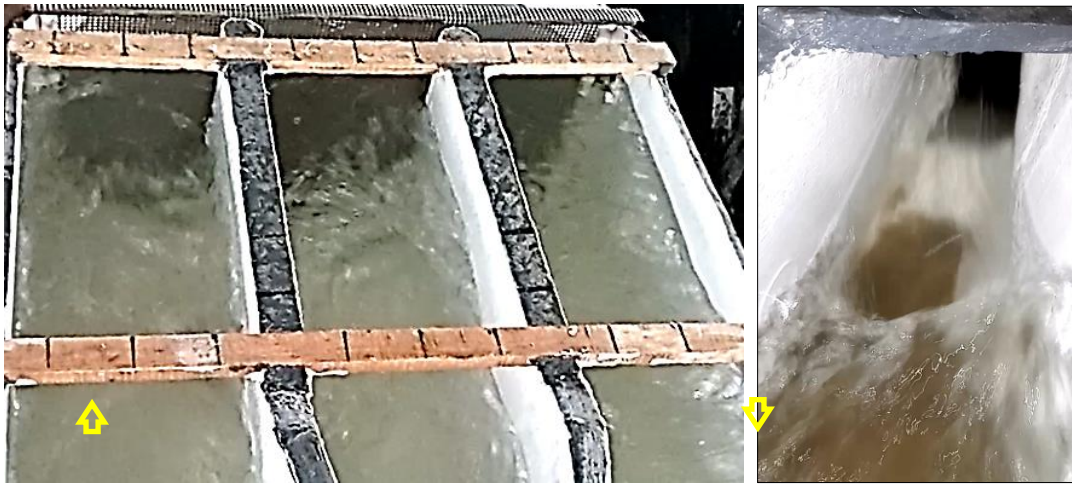
11.3.1 Respuesta ante Carga Media de sedimentos

La Tabla 11-13 presenta las condiciones de operación buscadas y alcanzadas finalmente en el modelo luego de un tiempo suficientemente largo de estabilización. De esta se observa que el valor de carga sedimentológica promedio alcanzada en el tiempo de experimentación fue de 18 kg/hora o 12 l/hora, lo que representó una escala de tiempo sedimentológica t_{sr} de 37.5, es decir, 1 hora en el modelo equivale a 37.5 horas en el prototipo. Esto implica que la experimentación, que tuvo una duración de 100 minutos, cubre más de un día de funcionamiento del prototipo.

Tabla 11-13. Operación del modelo. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	27.5 cm	27.2 cm
Caudal	45.4 l/s	44.7 l/s
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	59.7 cm	60.0 cm
Sedimento total ingresado al modelo	36.0 kg	30.0 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	36.0 kg	30.0 kg
Tiempo de ensayo	120.0 min	100.0 min
Tasa de abastecimiento neto	18.0 kg/h	18.0 kg/h
Escala t_{sr}	37.5	37.5
Número de bombas en operación	6	6

Como se muestra en la Figura 11-19, luego del tiempo de ensayo no se observaron depósitos de sedimentos en los canales de cribado. Tampoco se notó material sedimentado en el ITC, pero si se observaron sedimentos en la transición de entrega a la EEARC y en la zona de la cuchara bivalva. A la izquierda de la Figura 11-20 se muestran los depósitos observados luego de la reja de cribado los cuales se acumularon en la zona central mayoritariamente. Además, a la derecha, se presenta la sedimentación en cercanías a los exclusores de sedimentos donde se observa que no presentaron inconvenientes en su funcionamiento.



**Figura 11-19. Depósitos en los canales de cribado (izq.) y en entrada a la EEARC (der.).
Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio**



**Figura 11-20. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y en cercanías a exclusores (der.).
Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio**

La Figura 11-21 muestra a la izquierda, el depósito formado por el material granular derivado por los excluidores de sedimentos, y a la derecha, el resultado en los cárcamos de bombeo, donde se resalta la formación de zonas libres de sedimentos cerca de la succión de las bombas. La Figura 11-22 muestra de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación. En cuanto a los canales de cribado no se observó depositación, mientras que en el resto de la Estación se dio una sedimentación generalizada como se muestra en la imagen. El espesor de los depósitos en el fondo del modelo no superó los 20 mm o 27 cm en el prototipo específicamente aguas abajo de la reja de cribado. En la entrada y zona de cuchara bivalva, se encontraron espesores hasta de 4 cm o 55 cm en el prototipo.

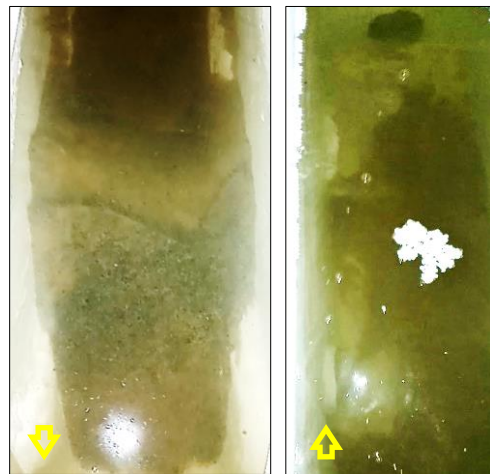


Figura 11-21. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio

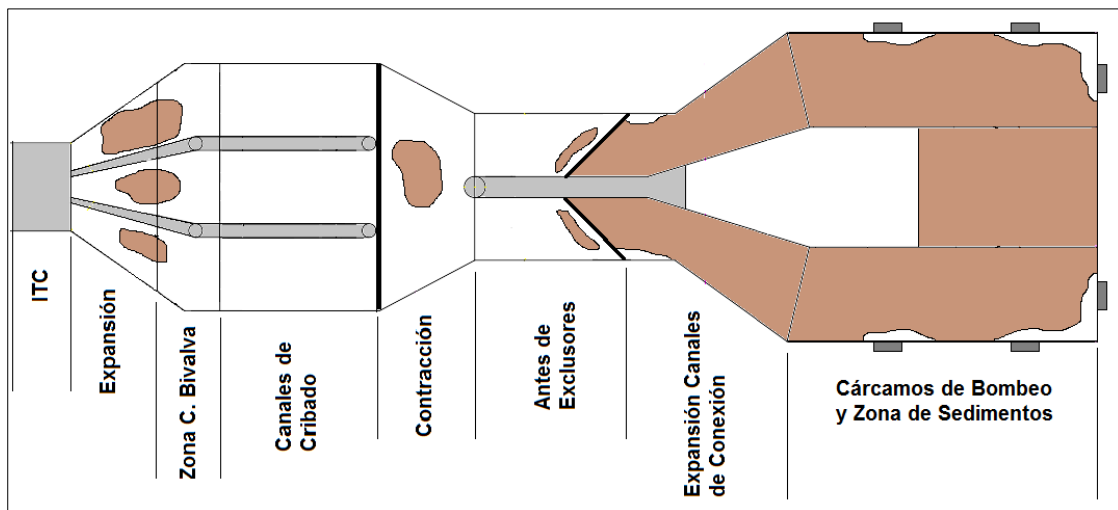


Figura 11-22. Esquema de depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio

La eficiencia del sistema de excluidores de sedimentos en esta condición de operación fue estimada a partir de la relación entre la carga o caudal sólido ($Q_s\%$) excluido y el caudal líquido ($Q_l\%$) derivado como se presentó en la investigación de Ordoñez y otros (2008) en la Figura 2-10 y Figura 2-12. Esto, debido a que la exclusión de sedimentos está estrechamente relacionada con el caudal líquido derivado por los excluidores, donde se busca maximizar la extracción de material minimizando la extracción de flujo de agua.

Tabla 11-14. Exclusión de sedimentos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de ensayo	100.0 min
2	Caudal	44.7 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	30.0 kg
4	Tasa de abastecimiento total	18.0 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	0.0 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	30.0 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	18.0 kg/h
8	Sedimentos excluidos	12.2 kg
9	Depósitos en la Estación	9.4 kg
10	Sedimentos bombeados (estimados)	8.4 kg
11	Caudal sólido excluido	7.3 kg/h
		40.7 %
12	Caudal líquido excluido	2.7 l/s
		6.1 %
13	Eficiencia de exclusión ($Q_s\%/Q_l\%$)	6.6

En la Tabla 11-14, las cantidades de sedimento se expresan en peso seco. Las filas 3 y 4 presentan el sedimento y tasa de abastecimiento total del ensayo. La fila 5 muestra la cantidad remanente en el ITC. Las filas 6 y 7 presentan el sedimento y abastecimiento neto de entrada a la Estación descontando el remanente en el ITC. Las filas 8 y 9 muestran la cantidad de material en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y en el fondo de la Estación. La fila 10 muestra la estimación de la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de excluidores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema propuesto de excluidores para este caso se calcula por la relación de derivación, en la fila 13.

Tabla 11-15. Niveles y espesores. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio

PARÁMETRO	MODELO	PROTOTIPO
Tiempo transcurrido	1.7 horas	62.8 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	60.0 cm	826.8 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	30.0 cm	413.4 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	40.0 cm	551.2 cm
Volumen depósito exclusión	8.0 l	21.3 m ³
Espesor depósito exclusión	2.0 cm	27.0 cm
Máximo espesor depósitos de fondo	2.0 cm	27.6 cm
Espesor depósitos en zona de entrada	4.0 cm	55.1 cm

La Tabla 11-15 presenta el resultado de algunas mediciones realizadas en el modelo y su valor correspondiente en el prototipo. Todos los valores de nivel de lámina de agua están referenciados al fondo local del modelo. Se presenta una estimación del espesor del depósito de material granular en la zona de exclusión.

Tabla 11-16. Granulometrías de depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio

Abertura Tamiz mm	% que pasa		
	Original	Exclusión	Fondo
5.00	99.8%	100.0%	100.0%
4.00	99.4%	99.7%	100.0%
3.15	98.4%	98.5%	99.6%
2.00	95.6%	94.4%	98.2%
1.00	83.6%	76.9%	88.4%
0.63	77.2%	64.4%	82.4%
0.40	64.9%	37.9%	70.6%
0.25	27.9%	8.7%	25.2%
0.16	6.7%	1.2%	3.2%
Fondo	0.0%	0.0%	0.4%

En la Tabla 11-16 y Figura 11-23 se presentan las granulometrías encontradas de los depósitos de sedimentos en el modelo. En general se estudiaron y diferenciaron los sedimentos derivados por los excluidores y sedimentados en el fondo del modelo. Específicamente se observa que las partículas bombeadas y expulsadas de la EEARC corresponden a los sedimentos más finos, y el material derivado por los excluidores, al grueso. La exclusión de partículas finas, menores de 0.2 mm en el modelo, o menores de 1 mm en el prototipo es mínima, y casi todo el material que entra es bombeado hacia la PTAR o permanece en los materiales depositados en los canales de cribado y los

cárcamos de bombeo. El material excluido está en el rango de 0.2 mm a 3.5 mm, o entre 0.7 mm y 5.0 cm en el prototipo. Se observa que el material depositado en el fondo es de gradación de tamaños similar a aquel original de entrada al modelo, pero habiendo predominancia de diámetros inferiores.

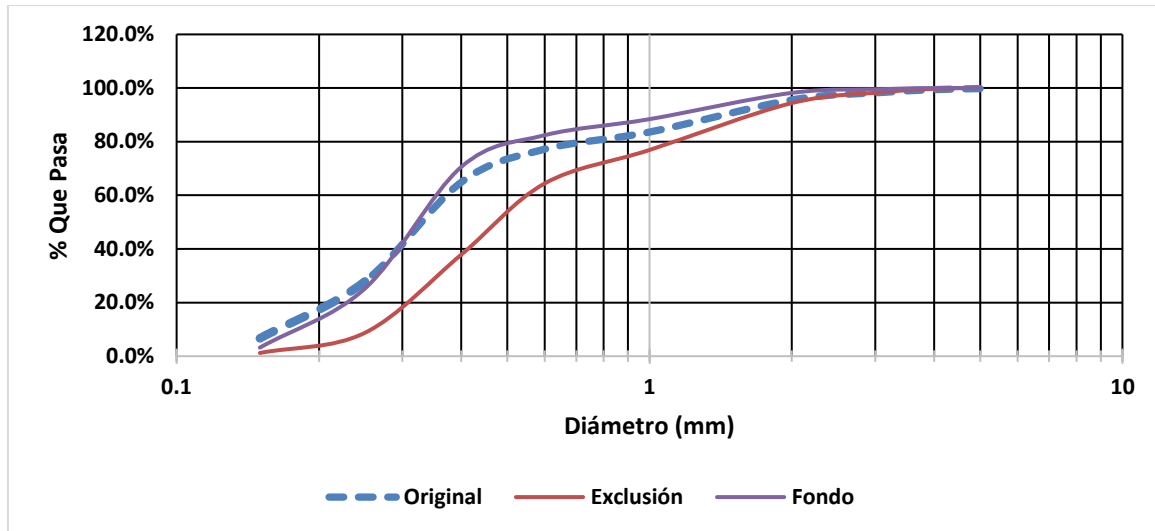


Figura 11-23. Curvas granulométricas de los depósitos de sedimentos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Medio.

11.3.2 Respuesta ante Carga Alta de sedimentos

La Tabla 11-17 presenta las condiciones de operación buscadas y alcanzadas finalmente por el modelo luego de un tiempo suficientemente largo de estabilización. De esta se observa que el valor de carga sedimentológica promedio alcanzada en el tiempo de experimentación fue de 40.3 kg/hora o 26.9 l/hora, lo que representó una escala de tiempo sedimentológica t_{sr} de 5.9, es decir, 1 hora en el modelo equivale a 5.9 horas en el prototipo. Esto implica que la experimentación, que tuvo una duración de 119 minutos, representa un poco menos de medio día de operación en el prototipo.

Después de terminado el ensayo no se observaron depósitos de sedimentos en los canales de cribado (Figura 11-24). A la izquierda de la Figura 11-25 se muestran los depósitos observados luego de la reja de cribado los cuales se distribuyeron principalmente en la zona central. A la derecha se presenta la depositación en cercanías a los excluidores a 45°.

Tabla 11-17. Condiciones de operación y abastecimiento de la Estación. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto.

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	27.5 cm	26.8 cm
Caudal	45.4 l/s	43.8 l/s
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	59.7 cm	61.0 cm
Sedimento total ingresado al modelo	76.0 kg	80.0 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	76.0 kg	80.0 kg
Tiempo de ensayo	120.0 min	119.0 min
Tasa de abastecimiento neto	38.0 kg/h	40.3 kg/h
Escala t_{sr}	5.6	5.9
Número de bombas en operación	6	6

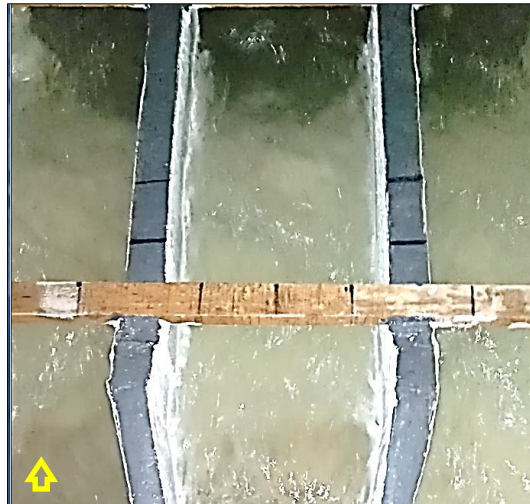


Figura 11-24. Canales de cribado. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

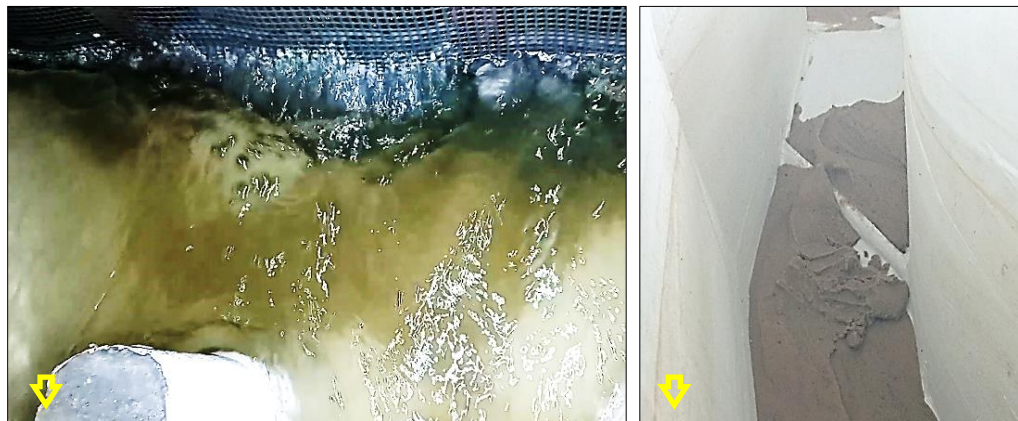


Figura 11-25. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

La Figura 11-26 muestra a la izquierda, luego de concluido el ensayo, la barra de sedimentos formada por el material granular derivado por los excluidores de sedimentos, y a la derecha, el resultado alcanzado en los cárcamos de bombeo donde se resalta la formación de zonas libres de sedimentos en los puntos de succión.



Figura 11-26. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

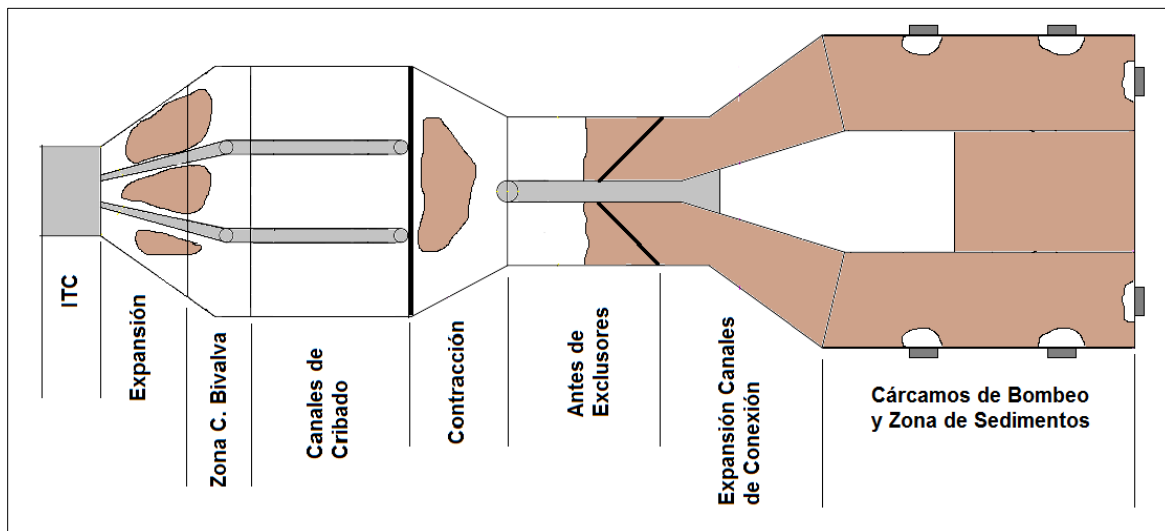


Figura 11-27. Esquema de depositación. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

La Figura 11-27 muestra de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación. Se observó sedimentación considerable a la entrada y en la zona de cuchara bivalva. En el resto de la Estación se dio una depositación generalizada como se muestra en la imagen. El espesor de los depósitos en el fondo del modelo alcanzó valores hasta de

4 cm o de 55 m en el prototipo, específicamente aguas abajo de la reja de cribado antes de los canales de conexión. En la zona de entrada en expansión y destinada a la cuchara bivalva, se encontraron espesores de depósito de hasta 4 cm o 55 cm en el prototipo. La eficiencia del sistema de excluidores en este ensayo fue estimada nuevamente por el porcentaje de material extraído y por la relación de exclusión.

Tabla 11-18. Exclusión de sedimentos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de ensayo	119.0 min
2	Caudal	43.8 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	80.0 kg
4	Tasa de abastecimiento total	40.3 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	0.0 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	80.0 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	40.3 kg/h
8	Sedimentos excluidos	37.7 kg
9	Depósitos en la Estación	21.2 kg
10	Sedimentos bombeados (estimados)	21.1 kg
11	Caudal sólido excluido	19.0 kg/h
		47.1 %
12	Caudal líquido excluido	3.2 l/s
		7.3 %
13	Eficiencia de exclusión (Q_s/Q_l)	6.5

En la Tabla 11-8, las cantidades totales de sedimento utilizados se expresaron como peso seco. Las filas 3 y 4 presentan respectivamente el sedimento y tasa de abastecimiento total utilizado en el ensayo y que ingresó por el ITC. La fila 5 muestra la cantidad encontrada de sedimentos remanentes en el ITC y que no ingresaron a la Estación en el tiempo de ensayo. Las filas 6 y 7 presentan el sedimento y abastecimiento neto de entrada a la Estación luego de descontar aquel remanente en el ITC. Las filas 8 y 9 muestran respectivamente la cantidad de material encontrado en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y al fondo de la Estación. La fila 10 presenta la estimación de la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de excluidores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema propuesto de excluidores para este caso se calcula como la relación entre los porcentajes de caudal líquido y sólido derivados durante el ensayo, en la fila 13.

La Tabla 11-19 presenta el resultado de algunas mediciones realizadas en el modelo y su valor correspondiente en el prototipo. Todos los valores de nivel de lámina de agua están referenciados al fondo local del modelo. Se presenta una estimación del espesor del depósito de material granular en la zona de sedimentos para contener el volumen de sedimentos excluidos.

Tabla 11-19. Medición de niveles y espesores. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

PARÁMETRO	MODELO	PROTOTIPO
Tiempo transcurrido	2.0 horas	11.7 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	61.0 cm	840.6 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	30.0 cm	413.4 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	32.5 cm	447.9 cm
Volumen depósito exclusión	25.0 l	65.8 m ³
Espesores depósito exclusión	6.1 cm	83.5 cm
Máximo espesor depósitos de fondo	4.0 cm	55.1 cm
Espesor depósitos en zona de entrada	4.0 cm	55.1 cm

La Tabla 11-20 y Figura 11-28 presentan las granulometrías de los depósitos en el modelo. Las partículas bombeadas y expulsadas de la EEARC correspondieron a los sedimentos más finos, y el material derivado por los excluidores el más grueso; se observa también que, la mayor parte de la fracción con diámetro de 0.25 mm e inferior fue bombeada.

Tabla 11-20. Granulometrías de los depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

Abertura Tamiz mm	% que pasa		
	Original	Exclusión	Fondo
5.00	99.8%	100.0%	100.0%
4.00	99.4%	99.6%	100.0%
3.15	98.4%	97.9%	99.5%
2.00	95.6%	94.4%	98.1%
1.00	83.6%	77.3%	90.7%
0.63	77.2%	67.2%	84.7%
0.40	64.9%	38.0%	67.1%
0.25	27.9%	5.8%	10.9%
0.16	6.7%	0.7%	2.1%
Fondo	0.0%	0.0%	0.0%

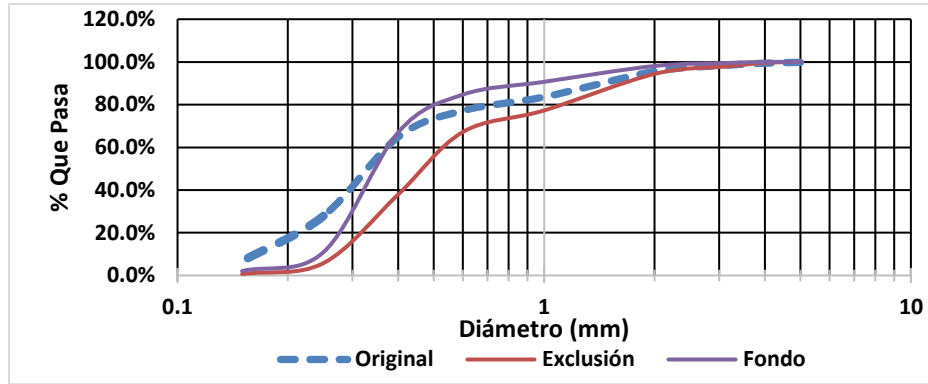


Figura 11-28. Granulometrías de depósitos. Caudal Medio Alto y Abastecimiento Alto

La exclusión de partículas finas, menores de 0.25mm en el modelo, o menores de 1mm en el prototipo es mínima, y casi todo el material que entra es bombeado hacia la planta de tratamiento, o permanece en los depósitos de los canales de cribado y cárcamos de bombeo. El material excluido está entre 0.2 mm y 3.5 mm, o entre 0.7mm y 5.0cm prototipo.

11.4 Caudal Máximo de operación

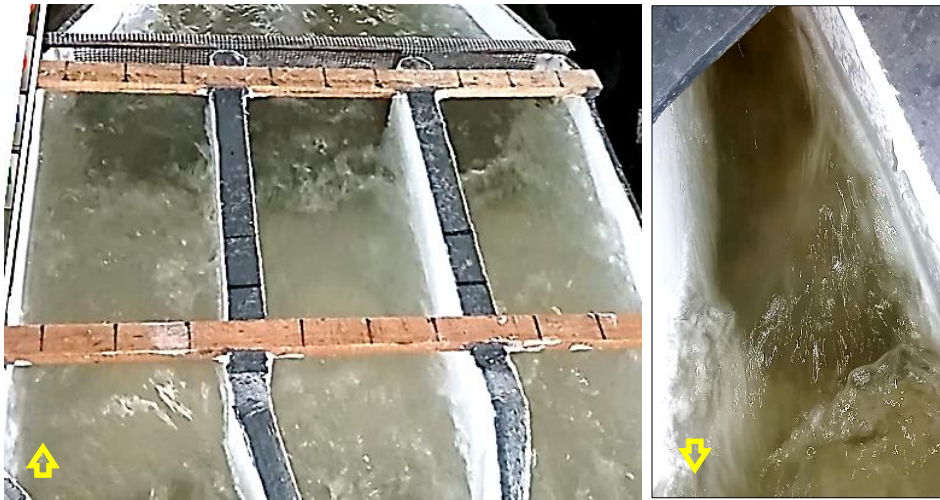
11.4.1 Respuesta ante Carga Media de sedimentos

La Tabla 11-21 presenta las condiciones desarrolladas en el modelo. De esta se observa que el valor de carga sedimentológica promedio alcanzada en el tiempo de experimentación tuvo un valor de 19.3 kg/hora o 12.9 l/hora, lo que representó una escala de tiempo sedimentológica t_{sr} de 40.4. Esto implica que la experimentación, que tuvo una duración de 70 minutos, cubre más de un día de respuesta en la realidad.

Tabla 11-21. Condición de operación del modelo. Caudal Máximo y abastecimiento Medio

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	29.9 cm	30.0 cm
Caudal	51.3 l/s	51.5 l/s
Nivel cárcamo bombeo	62.0 cm	63.0 cm
Sedimento total ingresado al modelo	18.0 kg	22.5 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	18.0 kg	22.5 kg
Tiempo de ensayo	60.0 min	70.0 min
Tasa de abastecimiento neto	18.0 kg/h	19.3 kg/h
Escala t_{sr}	37.5	40.4
Número de bombas en operación	6	6

Como se muestra en la Figura 11-29, luego del tiempo de ensayo no se observaron depósitos en los canales de cribado, tampoco se notó material sedimentado en el ITC, pero si se observaron sedimentos en la transición de entrega a la EEARC y en la zona de la cuchara bivalva. A la izquierda de la Figura 11-30 se muestra el depósito observado luego de la reja de cribado, en el cual se acumuló una pequeña cantidad en la zona central. Además, a la derecha de la imagen se presenta la sedimentación en cercanías a los excluidores de sedimentos.



**Figura 11-29. Depósito en los canales de cribado (izq.) y en entrada a la EEARC (der.).
Caudal Máximo y Abastecimiento Medio**



**Figura 11-30. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.).
Caudal Máximo y Abastecimiento Medio**

La Figura 11-31 muestra a la izquierda la acumulación de sedimentos en la zona de exclusión, y a la derecha, los depósitos en los cárcamos de bombeo, donde se resalta la formación de zonas libres de sedimentos en el fondo frente a la zona de succión de cada bomba. La Figura 11-32 muestra de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación. En cuanto a los canales de cribado no se observó depositación de material, y aguas abajo de la reja de cribado sólo una pequeña cantidad. La sedimentación importante se observó a partir de los exclusores a 45° en los canales de conexión por las disminuciones significativas en velocidad de flujo, sin superar un espesor de 1.5 cm como máximo.



Figura 11-31. Acumulación de sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Medio

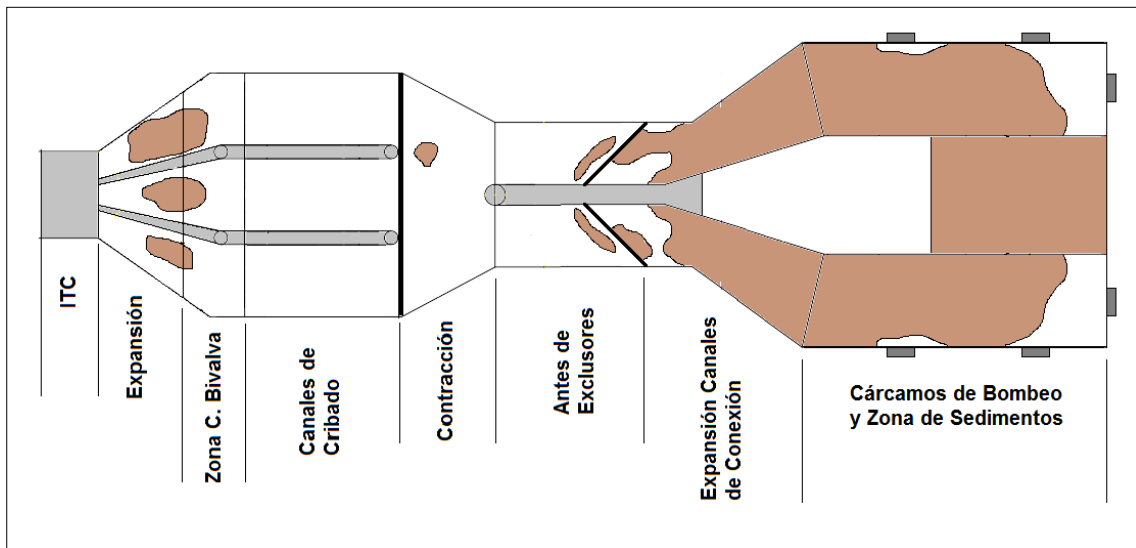


Figura 11-32. Esquema de depositación en planta. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio

Tabla 11-22. Exclusión de sedimentos. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de Ensayo	70.0 min
2	Caudal	51.5 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	22.5 kg
4	Tasa de abastecimiento total	19.3 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	0.0 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	22.5 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	19.3 kg/h
8	Sedimentos excluidos	8.0 kg
9	Depósitos en la Estación	6.1 kg
10	Sedimentos Bombeados (Estimados)	8.4 kg
11	Caudal sólido excluido	6.9 kg/h
		35.6 %
12	Caudal líquido excluido	3.1 l/s
		6.1 %
13	Eficiencia de exclusión ($Q_s\%/Q_l\%$)	5.9

En la Tabla 11-22, las cantidades de sedimento utilizados se expresaron como peso seco. Las filas 3 y 4 presentan el sedimento y tasa de abastecimiento total utilizado en el ensayo. La fila 5 muestra la cantidad remanente en el ITC. Las filas 6 y 7 presentan el sedimento y abastecimiento neto de entrada a la Estación descontando el remanente en el ITC. La fila 8 y 9 muestran la cantidad de material en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y en el fondo de la Estación. La fila 10 estima la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de exclusores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema propuesto de exclusores para este caso se calcula por la relación de derivación en la fila 13.

La Tabla 11-23 presenta el resultado de algunas mediciones realizadas en el modelo y su valor correspondiente en el prototipo. Todos los valores de nivel de lámina de agua están referenciados al fondo local del modelo. Se presenta una estimación del espesor de los depósitos en la zona de exclusión.

Tabla 11-23. Niveles y espesores. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio

PARÁMETRO	MODELO	PROTOTIPO
Tiempo transcurrido	1.2 horas	47.1 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	63.0 cm	868.1 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	32.8 cm	452.0 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	36.3 cm	500.2 cm
Volumen depósito exclusión	5.0 l	14.0 m ³
Espesor depósito exclusión	1.3 cm	17.7 cm
Máximo espesor depósitos de fondo	1.5 cm	20.7 cm
Espesor depósitos en zona de entrada	4.0 cm	55.1 cm

A continuación se presentan las granulometrías encontradas en los depósitos del modelo, (Tabla 11-24 y Figura 11-33). En general se estudiaron y diferenciaron los sedimentos derivados por los excluidores y sedimentados en el fondo del modelo. Se observó que las bombas succionaron una buena cantidad de materiales por debajo de 0.5 mm, equivalentes a partículas menores de 4,5 mm en el prototipo. De igual forma, las granulometrías encontradas fueron similares entre sí, lo cual es debido probablemente a que todos los materiales, incluyendo los mayores tamaños tuvieron similar movilidad en el campo de flujo, debido al alto caudal y alta velocidad del flujo.

Tabla 11-24. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio.

Abertura Tamiz	% que pasa		
	Original	Exclusión	Fondo
mm			
5.00	99.8%	100.0%	100.0%
4.00	99.4%	99.6%	100.0%
3.15	98.4%	98.4%	99.1%
2.00	95.6%	95.0%	96.5%
1.00	83.6%	81.5%	79.8%
0.63	77.2%	72.5%	68.7%
0.40	64.9%	45.4%	52.9%
0.25	27.9%	12.7%	9.3%
0.16	6.7%	1.1%	1.6%
Fondo	0.0%	0.0%	0.0%

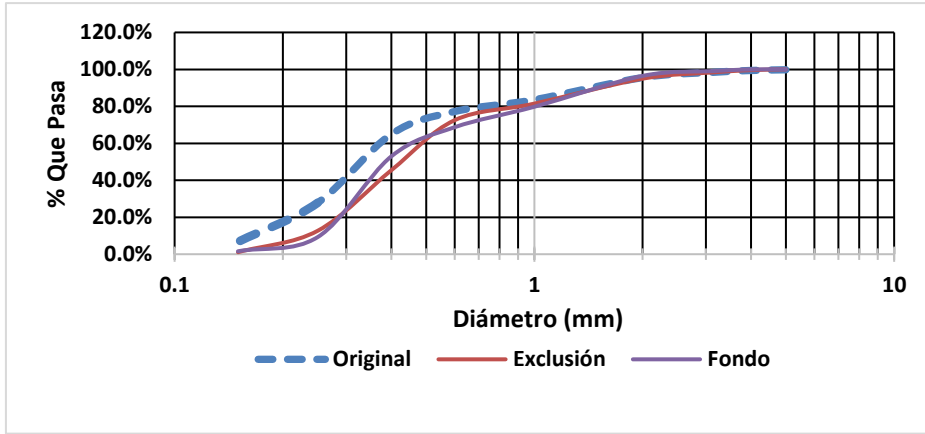


Figura 11-33. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Medio

11.4.2 Respuesta ante Carga Alta de sedimentos

La Tabla 11-25 presenta las condiciones de operación buscadas y alcanzadas en el ensayo luego de un tiempo suficientemente largo de estabilización. Se observa que el valor de carga sedimentológica promedio alcanzada en el tiempo de experimentación fue de 41.7 kg/hora o 27.8 l/hora, lo que representó una escala de tiempo sedimentológica t_{sr} de 6.2, es decir, 1 hora en el modelo equivale a 6.2 horas en el prototipo.

Tabla 11-25. Operación y abastecimiento del modelo. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

CONDICIÓN	BUSCADO	ALCANZADO
Nivel canaleta Parshall	29.9 cm	29.9 cm
Caudal	51.3 l/s	51.3 l/s
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	62.0 cm	62.0 cm
Sedimento total ingresado al modelo	76.0 kg	75.0 kg
Sedimento neto ingresado a la Estación	76.0 kg	75.0 kg
Tiempo de ensayo	120.0 min	108.0 min
Tasa de abastecimiento neto	38.0 kg/h	41.7 kg/h
Escala t_{sr}	5.6	6.2
Número de bombas en operación	6	6

La Figura 11-34, muestra que al finalizar el ensayo no se observaron depósitos en los canales de cribado. A la izquierda de la Figura 11-35 se muestran los depósitos evidenciados luego de la reja de cribado los cuales fueron muy pequeños y se distribuyeron principalmente en la zona centro izquierda. A la derecha se observa la depositación en cercanías a los exclusores a 45°, donde se observó abundante sedimentación.



Figura 11-34. Depósitos en los canales de cribado. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

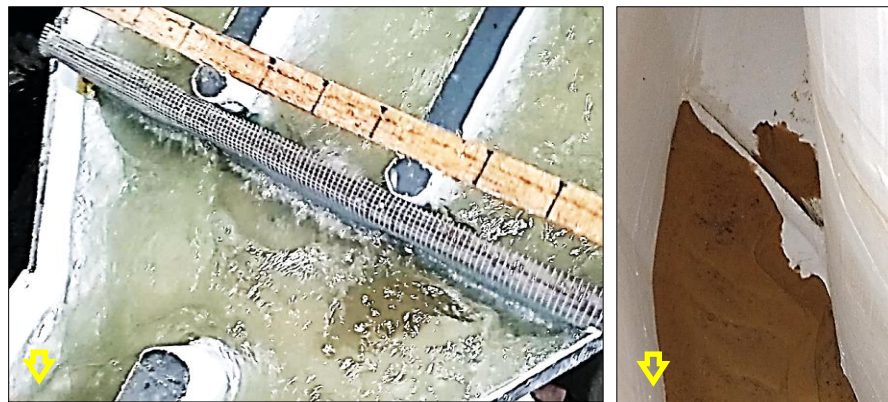


Figura 11-35. Depósito luego de reja de cribado (izq.) y cerca de los excluidores (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Alto



Figura 11-36. Sedimentos excluidos (izq.) y cárcamos de bombeo (der.). Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

La Figura 11-36 muestra a la izquierda, la acumulación de sedimentos formada por el material granular derivado por los excluidores de sedimentos, y a la derecha, el depósito formado en los cárcamos de bombeo con formación de zonas libres de sedimentos frente a la succión de cada bomba. La Figura 11-37 muestra de forma esquemática la depositación de sedimentos en la Estación.

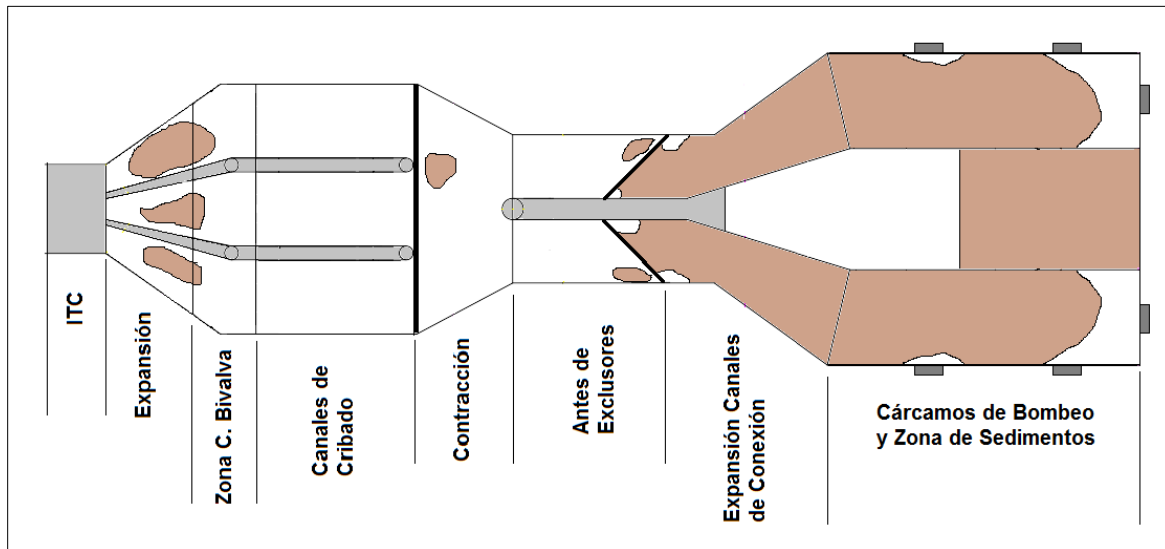


Figura 11-37. Esquema de depositación en planta. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

Se dio una sedimentación considerable en la sección de expansión en la entrada y zona de cuchara bivalva proveniente de los sedimentos de arrastre del ITC. En el resto de la Estación se dio una depositación generalizada como se muestra en la imagen. El espesor de los depósitos en el fondo del modelo alcanzó valores hasta de 3 cm o de 41 cm en el prototipo, específicamente al inicio de los cárcamos de bombeo. En la entrada en expansión se encontraron espesores de hasta 4 cm o 55 cm en el prototipo. La eficiencia del sistema de excluidores en este ensayo fue estimada nuevamente por el porcentaje de material extraído y por la relación de exclusión.

En la Tabla 11-26, las cantidades de sedimento utilizados en el ensayo se expresaron como peso seco. Las filas 3 y 4 presentan el sedimento y tasa de abastecimiento total utilizado en el ensayo. La fila 5 muestra la cantidad de sedimentos en el ITC y que no ingresaron a la Estación. Las filas 6 y 7 presentan la tasa de abastecimiento neto de entrada a la Estación luego de descontar el remanente en el ITC. Las filas 8 y 9 muestran

la cantidad de material encontrado en la zona de acumulación de sedimentos excluidos y en el fondo de la Estación. La fila 10 presenta la estimación de la cantidad de sedimentos bombeados. En las filas 11 y 12 se presentan los caudales sólidos y líquidos que pasaron por el sistema de excluidores, y su porcentaje con respecto al abastecimiento neto de entrada y al caudal líquido de la Estación. Finalmente, la eficiencia del sistema propuesto de excluidores para este caso se calcula como por la relación de derivación en la fila 13. La Tabla 11-27 presenta el resultado de algunas mediciones realizadas en el modelo y su valor correspondiente en el prototipo

Tabla 11-26. Exclusión de sedimentos. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

NÚMERO	PARÁMETRO	VALOR
1	Tiempo de ensayo	108.0 min
2	Caudal	51.3 l/s
3	Sedimento total ingresado al modelo	75.0 kg
4	Tasa de abastecimiento total	41.7 kg/h
5	Sedimentos remanentes en ITC	0.0 kg
6	Sedimento neto ingresado a la Estación	75.0 kg
7	Tasa de abastecimiento neto	41.7 kg/h
8	Sedimentos excluidos	33.1 kg
9	Depósitos en la Estación	16.1 kg
10	Sedimentos bombeados (estimados)	25.8 kg
11	Caudal sólido excluido	18.4 kg/h
		44.1 %
12	Caudal líquido excluido	3.5 l/s
		6.8 %
13	Eficiencia de exclusión ($Q_s\%/Q_l\%$)	6.5

Tabla 11-27. Medición de niveles y espesores. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

Parámetro	Modelo	Prototipo
Tiempo transcurrido	1.8 horas	11.1 horas
Nivel de lámina de agua en cárcamo bombeo	62.0 cm	854.4 cm
Nivel de lámina de agua en zona de cribado	31.0 cm	427.2 cm
Nivel de lámina de agua en zona de sedimentos	27.5 cm	379.0 cm
Volumen depósito exclusión	22 l	57.7 m ³
Espesor depósito exclusión	5.3 cm	73.3 cm
Máximo espesor depósito de Fondo	3.0 cm	41.3 cm
Máximo espesor depósito de entrada	4.0 cm	55.1 cm

Tabla 11-28. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto.

Abertura Tamiz mm	% Pasa		
	Original	Exclusión	Fondo
5.00	99.8%	100.0%	100.0%
4.00	99.4%	99.5%	100.0%
3.15	98.4%	97.4%	99.8%
2.00	95.6%	92.4%	99.0%
1.00	83.6%	65.7%	94.2%
0.63	77.2%	53.8%	90.5%
0.40	64.9%	28.5%	77.3%
0.25	27.9%	5.4%	23.0%
0.16	6.7%	0.6%	3.9%
Fondo	0.0%	0.0%	0.0%

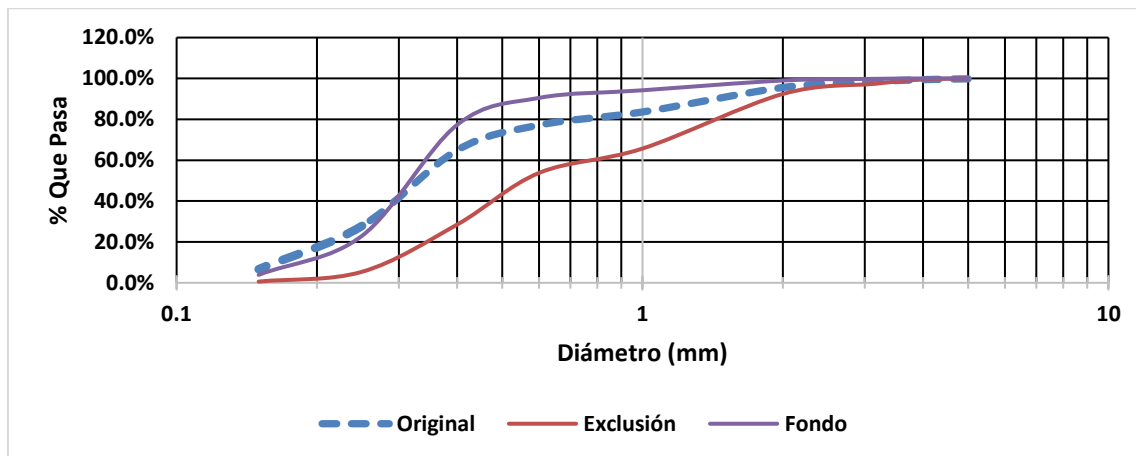


Figura 11-38. Granulometrías de los depósitos. Caudal Máximo y Abastecimiento Alto

Se observa que las partículas bombeadas y expulsadas de la EEARC corresponden a los sedimentos más finos, y el material derivado por los excluidores, al más grueso. Se observó que una parte de la fracción del material con diámetro menor de 0.3 mm fue bombeada y expulsada del modelo. La exclusión de partículas finas, menores de 0.2 mm en el modelo, o menores de 1 mm en el prototipo es mínima, y casi todo el material que entra es bombeado hacia la PTAR, o permanece en los materiales depositados en los canales de cribado y los cárcamos de bombeo. El material excluido está en el rango de 0.2 mm a 3.5 mm, o entre 0.7 y 5.0 cm en el prototipo. Para este caso, el material de fondo de la Estación presentó una variación de tamaños entre 0.2 mm y 2.5 mm, pero con predominancia en la fracción de tamaños entre 0.2 mm y 1.6 mm que en el prototipo hacen referencia a partículas de diámetro entre 0.5 mm y 20 mm.

12. Conclusiones y recomendaciones

- La revisión de la literatura sobre depósitos y transporte de sedimentos en las tuberías de alcantarillados combinados en todo el mundo, así como de la propia experiencia en la ciudad de Bogotá, con un amplio sector de la misma en zonas de piedemonte, revela la posibilidad de encontrar materiales con granulometrías variadas, y tamaños hasta de 5 cm aproximadamente. En la EEARC (estructura indispensable para la PTAR Canoas), estos podrían superar la etapa de cribado, y eventualmente generar deterioros importantes y problemas de mantenimiento en los equipos de bombeo.
- Las condiciones especiales de la Estación, colocada a 40m de profundidad, dificulta la extracción de los sedimentos gruesos que puedan pasar las rejillas de cribado, por lo cual en la presente investigación se sugirieron y probaron cambios de diseño para permitir una adecuada división del flujo al ingreso de los cárcamos de bombeo, y se demostró la utilidad y eficiencia de excluidores de sedimentos para disminuir la carga de material grueso que las bombas debieran succionar hacia la PTAR.
- La Tabla 12-1 presenta un resumen general de la evaluación hidráulica, y del transporte y exclusión de sedimentos en la EEARC, donde todos los valores están escalados al prototipo. Como se puede observar, se presentan los resultados más relevantes tanto de la modelación hidráulica sin sedimentos, como con sedimentos, considerando las condiciones de caudal de operación en combinación con la condición de abastecimiento medio o alto. A partir de esta y de los resultados ya presentados anteriormente, se presentan las conclusiones obtenidas de la modelación.

Tabla 12-1. Resumen de resultados obtenidos y escalados al prototipo

PARÁMETRO	CAUDAL DE OPERACIÓN						
	BAJO	MEDIO		MEDIO ALTO		MÁXIMO	
Velocidad media en reja	0.7m/s	0.6m/s		0.8m/s		0.9m/s	
Repartición de caudal	20%60%20%	36%40%24%		31%39%30%		31%37%32%	
Oscilación del nivel de agua en los cárcamos	14mm	69mm		138mm		207mm	
Vórtices superficiales en cárcamos	NO	NO		Leves y efímeros		Leves y permanentes	
Abastecimiento de sedimentos	Bajo	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio	Alto
% Sedimentos bombeados	24%	22%	12%	28%	26%	37%	34%
% Sedimentos excluidos	41%	52%	33%	41%	47%	36%	44%
% sedimentos excluidos $0,7\text{mm} \leq D_p \leq 50\text{mm}$	58%	75%	63%	60%	65%	37%	86%
% Caudal excluidos	23%	11%	11%	6%	7%	6%	7%
Eficiencia de exclusión $Q_s(\%)/Q_l(\%)$	1.7	4.9	3.1	6.6	6.5	5.9	6.5
Tamaños sedimentos de Fondo prototipo (mm)	0.30-7.0	0.3-15	0.34-15	0.3-20	0.3-20	0.34-25	0.3-18
Tamaños sedimentos Excluidos prototipo (mm)	0.7-50	0.7-50	0.7-50	0.7-50	0.7-50	0.7-50	0.7-50

- La repartición del flujo en las cámaras de cribado se hace más equitativa a medida que el caudal de operación de la Estación aumenta. Sin embargo, se encontró para todos los casos, una tendencia a un mayor caudal de paso por el canal de cribado central. Por este motivo, se obtuvo velocidades medias en cercanías de la reja de cribado entre 0.7 m/s y 0.9 m/s en el prototipo, las cuales estuvieron en el rango de velocidades permisibles para el cribado (0.5 m/s y 1.35 m/s). Es posible que la repartición de caudales pueda mejorar un poco más, si el ancho de paso central en los muros deflectores de entrada disminuye.
- Para todas las condiciones de operación se observó una aceleración del flujo a la salida del ITC con la formación de aparentes resaltos hidráulicos ahogados en los muros divisorios. La intensidad y energía de este fenómeno fue muy baja hasta el caudal medio, y aumentó para los caudales medio alto y máximo. Es posible que estos fenómenos locales se deban en parte a la disposición del flujo de entrada en el modelo que depende en buena parte de la fricción de la tubería (que es bastante mayor que la del prototipo) generando una pendiente mayor que la real del ITC. Por esto, es probable que este fenómeno no esté presente en el prototipo.

- Debido a la condición de flujo rápidamente variado a lo largo de la zona de cribado de la Estación, se observó la presencia de vórtices, corrientes secundarias y chorros. Estas condiciones de flujo dificultaron la medición y estimación de las velocidades medias de flujo en los canales de cribado, por lo que se hizo necesario considerar estos efectos al momento del procesamiento de información, como se presentó en la sección de Programa Experimental.
- Se observaron oscilaciones de nivel en los cárcamos de bombeo que representaron en el prototipo valores hasta de 20 cm para el caudal máximo de operación. Se utilizó material flotante para observar la formación de vórtices superficiales para los diferentes caudales; estos fenómenos estuvieron totalmente ausentes para los caudales bajo y medio, pero si ocurrieron para los caudales medio alto y máximo donde se registraron algunas rotaciones que fueron leves, pero efímeras en el primer caso y más constantes en el segundo.
- Se observó una dependencia entre el porcentaje de sedimentos bombeados y el caudal de flujo, donde se notó que un mayor valor de éste representó una mayor capacidad de transporte y por tanto una mayor fracción de sedimentos alcanzaron los cárcamos de bombeo para ser succionados.
- Para condiciones de operación con caudales y niveles altos en los cárcamos de bombeo, se observó la formación de zonas libres de sedimentos en los sectores de succión de las bombas, lo cual corresponde con la idea general del diseño básico en cuanto a que las bombas deben succionar todo el material sólido que llegue a ellas. Sin embargo, se encontró que los exclusores pueden eliminar una parte importante de los materiales más gruesos que potencialmente pudiesen afectar los rotores de estos equipos.
- Del rendimiento y respuesta finalmente encontrada del sistema de exclusores de sedimentos para la EEARC, se obtuvo las gráficas de la Figura 12-1. Para su determinación, se tuvo en cuenta los ensayos con capacidad de transporte similar a la tasa de abastecimiento de sedimentos de la Estación, y de esta forma tener resultados más comparables entre sí. Cabe aclarar que los resultados obtenidos en la presente

investigación frente al comportamiento de los excluidores, no discriminan el rendimiento individual de cada uno de los tipos utilizados (frontales y a 45°), por lo que los resultados logrados representan un comportamiento general del sistema.

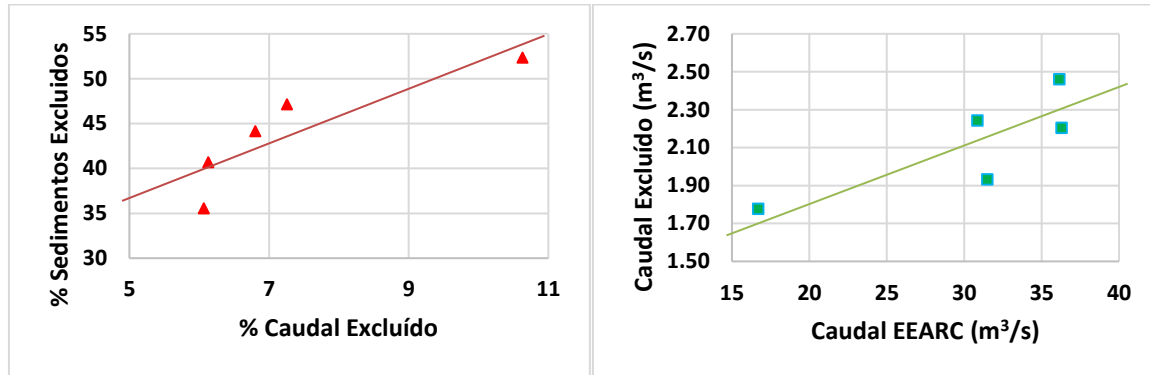


Figura 12-1. Rendimiento del sistema de exclusión de sedimentos EEARC

A la izquierda de la imagen, se nota que es posible obtener un porcentaje de exclusión de sedimentos entre el 35% y el 40% para caudales derivados de alrededor del 6%, lo que para el caudal máximo de operación estaría alrededor de los 2 m³/s. Por otra parte, teniendo en cuenta solamente las partículas de diámetros superiores a 0,7 mm en el prototipo, la derivación de sedimentos para caudales de los excluidores del orden del 6% estaría alrededor del 60% (Tabla 12-1), y podría mejorar con un mejor diseño de los excluidores frontales.

- Los resultados demuestran la buena eficiencia de los sistemas de exclusión de sedimentos, y ratifican su pertinencia aún en este proyecto sui-generis donde se planteó desde el diseño básico la imposibilidad de eliminarlos del bombeo. Sin embargo, es claro que, si se mantienen los volúmenes aproximados de material entrante, deberán presentarse problemas de acumulación de sedimentos en todas las partes de la Estación donde existe flujo de aguas residuales, por lo que es importante contar con medios mecánicos adicionales de limpieza y mantener accesibilidad a las zonas más importantes como son las cámaras de cribado y los cárcamos de bombeo. La existencia de sistemas redundantes de control de sedimentos es también deseable; de allí la importancia de los excluidores recomendados.

- Dado que para lograr las tasas de derivación necesarias se requiere dotar al foso de sedimentación con bombas de achique de un caudal relativamente alto, se considera necesario limitar los caudales líquidos excluidos a un máximo de 1.6 a 1.7 m³/s, lo cual se puede lograr con dos bombas sumergibles de eje vertical de 0.85 m³/s, con motores de 75 HP. Este sistema devolvería el caudal derivado por los exclusores hacia los canales de conexión, y mantendría las condiciones de carga y gradiente hidráulico de los exclusores en los valores deseados. Las dos bombas podrían operar en forma independiente de acuerdo con el caudal de la Estación y la afluencia de material sólido. Este sistema requiere desde luego de un rediseño del foso de depositación, haciéndolo un poco más profundo que el piso de los cárcamos de bombeo (alrededor de 2 m adicionales), y así aumentar el volumen de retención de sedimentos. Las bombas se deben colocar en una posición que no afecte el funcionamiento del vertedero de excesos, la altura mínima en el fondo sería del orden de 80 cm y la máxima cabeza de succión sería del orden de 2 m, todo lo cual es posible dentro del diseño final de la Estación.
- Los resultados obtenidos en cuanto a rangos de tamaños de partículas excluidas y eficiencias en los procesos de exclusión ratifican la utilidad de estos sistemas de control de sedimentos operados hidráulicamente. Para el caso de la EEARC, los exclusores de sedimentos pueden disminuir significativamente el mantenimiento de los equipos de bombeo, conduciendo parte de este material a lugares de fácil remoción, reduciendo así la posibilidad de ocasionar cierres parciales o totales de operación de la Estación.
- Entre los lugares más recurrentes donde se observó la formación de depósitos de material para las condiciones de operación estudiadas de la EEARC se resaltan los siguientes: el sector central de contracción del flujo (aguas abajo de la reja de cribado) que presentó depositación para todas las condiciones de operación; el fondo de los cárcamos de bombeo; la entrada en expansión, y la zona de cuchara bivalva. La depositación observada en los canales de cribado y de conexión dependió del caudal de operación y abastecimiento de sedimentos, donde para los caudales bajo y medio se evidenció sedimentación en los canales de cribado y en la totalidad de los canales de conexión, mientras que para los caudales medio alto y máximo no se observaron depósitos en los canales de cribado, ni en la primera parte de los canales de conexión.

- El uso de un único tipo de material de arrastre para la experimentación (arena), que en el presente caso se puede utilizar debido al tamaño de los sedimentos en el prototipo (gruesos), y a la baja escala longitudinal del modelo, demuestra que no solo el material grueso puede depositarse en los fondos de las diferentes partes de la Estación, sino también así los materiales más finos, aumentando las necesidades de limpieza mecánica de la Estación. No se consideró el uso de materiales de diferente densidad, ya que esto puede causar que los materiales más finos no se mezclen con los gruesos y se mantengan permanentemente en suspensión. Esto hubiera dado una idea equivocada sobre la verdadera magnitud del fenómeno de depositación de sedimentos en el campo de flujo.
- Se recomienda que la instalación UISA y todas las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Nacional, sean revisadas y dadas mantenimiento periódicamente, para que sea posible la realización de estudios experimentales como el del presente proyecto, y disminuya de esta forma las limitaciones y dificultades en cuanto a la toma de información, fallas técnicas y retrasos.

13. Bibliografía

- Abernathy, F. (1958). *Fundamentals of Boundary Layers*. University of Harvard: The national committee for fluid mechanics films.
- Ackers, P., Crickmore, M., & Holmes, D. (1964). Effects of use on the hydraulic resistance of drainage conduits. *Institution of civil Engineers*.
- ANSI/HI 9.8. (2018). *Rotodynamic Pumps for Pump Intake Design*. USA: ANSI.
- Arthur, S., Ashley, R., & Chandramouli, N. (1996). Near Bed Solids Transport in Sewers. *Wal. Sci. Tech*, 69-76.
- Chaudhry, H. (2007). *Open-Channel Flow*. Columbia: Springer US.
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw - Hill.
- Duarte, C. (2017). *Mecánica de Fluidos e hidráulica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- EAAB. (2017). PTAR CANOAS. *Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá*.
- EAAB. (2019). *El Saneamiento del río Bogotá es una realidad con la PTAR CANOAS*. Bogotá: Acueducto.
- Flórez Otero, F. (2008). *Estudio Experimental de las Escalas de Socavación en cercanía a Estructuras Hidráulicas en Modelos de Fondo Móvil*. Bogotá: Universidad Nacional De Colombia.
- García, M. (2008). *Sedimentation Engineering*. ASCE.
- Ghani, A. (1993). Sediment Transport in Sewers.
- Ghani, A., Zakaria, N., Kassim, M., & Nasir, B. (2000). Sediment size characteristics of urban drains in Malaysian cities. *Urban Water*, 336-341.
- Huber Technology. (2015). *Huber Technology Waste Water Solutions*. Obtenido de <https://www.huber-technology.cl/es/huber-report/ablage-berichte/screens/huber-technology-upgrades-the-inlet-works-at-duncrue-street-belfast-a-wastewater-case-study.html>

- Huber Technology. (2015 de 04 de 2015). The upgrade of a major Inlet Works. Duncrue Street - Belfast WwTW Project. The Problem, solution and benefits. Belfast, Duncrue Street, Northern Ireland.
- IDEAM. (2017). Sentencia del Río Bogotá. *Observatorio Colombiano De Gobernanza del agua*.
- ILCE. (2015). *Biblioteca digital ILCE*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>
- May, R. (1982). Sediment Transport in Sewers. *Hydraulic Research Station*.
- Ordóñez Ordóñez, J. I. (2012). Modelación Física: herramienta poderosa del diseñador hidráulico. En J. I. Ordóñez Ordóñez, *Modelación Física: herramienta poderosa del diseñador hidráulico* (pág. 12). Banco Mundial.
- Ordóñez, J. I., & Camacho, L. A. (2020). Contenido de Materiales Inorgánicos Gruesos en las Aguas Residuales.
- Ordoñez, J. I., Flórez, F., & Cubillos, C. (2008). Excluidores de Sedimentos a 45° en lechos arenosos. *IAHR*.
- Simons, D., & Senturk, F. (1992). *Sediment Transport Technology*. Michigan: Water Resources Publications.
- Sutherland, J., & Barfuss, S. (2011). Composite Modelling: Combining Physical and Numerical Models. *IAHR*.
- Vanoni, V. (1972). *Sedimentation Engineering*. ASCE.