CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

D. Ángel Faz Cano, Presidente/a de la Comisión Académica del Programa Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minera y Ambiental.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, “Optimización de los sistemas de captación de fondo con alto contenido de transporte de sedimentos”, ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D^a. Patricia Lorena Haro Ruiz, bajo la dirección y supervisión del Dr. Luis Gerardo Castillo Elsitdié y el Dr. Juan Tomás García Bermejo.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 15 de julio de 2019

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

ANGEL|
FAZ|CANO

Firmado digitalmente por ANGEL|FAZ|CANO
Nombre de reconocimiento (DN): cn=ANGEL|
FAZ|CANO, serialNumber=[REDACTED]
givenName=ANGEL, sn=FAZ CANO,
ou=CIUDADANOS, o=ACCV, c=ES
Fecha: 2019.07.17 09:01:32 +02'00'

Fdo: Dr. Ángel Faz Cano

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MINERA Y CIVIL

**OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO
CON ALTO CONTENIDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

PATRICIA LORENA HARO RUIZ

DIRECTOR: DR. LUIS GERARDO CASTILLO ELSITDIÉ

CODIRECTOR: DR. JUAN TOMÁS GARCÍA BERMEJO

Cartagena, 2019

AGRADECIMIENTO

Hay quienes dicen que la ciencia y Dios no están relacionados, pero para mí, Dios siempre va a estar presente en todas las cosas y en todo lo que hagamos. Así que voy a empezar dándole gracias a Dios por haberme colocado en este camino y haber sido el gran apoyo de mi familia en esta temporada fuera de casa y en todas las cosas que nos ha permitido vivir.

En segundo lugar, quiero agradecer al Dr. José María Carrillo. Sin ese —*¿Y a ti no te interesa estudiar un doctorado?*— y todas las gestiones que realizó para que pudiera inscribirme y cursar este programa no habría llegado hasta aquí. Su ayuda y visión como profesional y educador también se han constituido en una fuente de apoyo en este desarrollo.

Aunque los coloque en tercer lugar, no son menos importantes para mí, mi director y codirector de tesis: el Dr. Luis Castillo Elsitdié y el Dr. Juan García Bermejo. Sus consejos, su paciencia, su dedicación y sus llamados de atención me han ayudado mucho en el desarrollo de este proyecto doctoral y también en mi vida personal. Gracias también por darse tiempo de escuchar mis problemas personales.

A Jorge Moreno, Mario, Juan Carlos y Benito. Sin su valiosa ayuda, la mayoría de las mediciones de laboratorio que se realizaron para este proyecto no se hubieran podido concretar. Muchísimas gracias por su paciencia, interés y trabajo duro.

A la Dra. Sonia Busquier por sus enseñanzas sobre cómo programar en el entorno de MATLAB. Sin el tiempo y la dedicación que ella invirtió para ayudarme, no habría comprendido algunos aspectos del funcionamiento de este programa.

A Paqui y Pato, su visión y sus comentarios me han ayudado cuando no encontraba alternativas.

A la Escuela Politécnica Nacional, Fundación Carolina y la Universidad Politécnica de Cartagena por confiar en mí y otorgarme la beca que me ha permitido cursar este programa doctoral y tener a mi familia junto a mí.

A mi familia, JuanCa y Ainhoa, gracias por su amor incondicional, su apoyo, sus desvelos y, sobre todo: por no dejar de creer en mí.

Al resto de mi familia en Ecuador, gracias por estar siempre presente.

DEDICATORIA

A mi familia: **JuanCa** y **Ainhua**. Dios siempre sabe lo que hace.

A mis padres: Beatriz y Joel. Las tormentas también pasan.

A mis hermanos: Esteban y Vane; y Walter y Gaby.

A mis sobrinas: Valentina, Rafaela y Paula.

CONTENIDO

Contenido

AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
CONTENIDO	V
SIMBOLOGÍA	XXIII
RESUMEN.....	XXIX
ABSTRACT	XXXI
PRESENTACIÓN	XXXIII
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES: MOTIVACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO.....	1
1.2 ESTADO DEL ARTE	6
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS REJAS DE FONDO.....	8
1.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO	9
1.2.3 DEFINICIÓN DE LA LONGITUD DE REJA Y DEL COEFICIENTE DE DESCARGA.....	14
1.2.4 DINÁMICA DE FUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	37
1.2.5 RÉGIMEN DE FLUJO SUPERCRÍTICO	46
1.2.6 ANÁLISIS DIMENSIONAL	54
1.2.7 CONSIDERACIÓN DE LA PRESENCIA DE SEDIMENTOS EN EL DISEÑO DE REJAS DE CAPTACIÓN DE FONDO	56
1.2.8 OBJETIVOS DE LA TESIS	66
CAPITULO 2 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE REJA DE FONDO CONSTRUIDO.....	67
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE FONDO CONSTRUIDO EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UPCT	67
2.1.1 ARQUETA DE TOMA	68
2.1.2 CANAL DE APROXIMACIÓN	68
2.1.3 REJAS DE BARRAS LONGITUDINALES.....	69
2.1.4 CANAL DE RECOLECCIÓN DE AGUA CAPTADA Y CONDUCCIÓN AL DESARENADOR	70

2.1.5	DESARENADOR.....	70
2.1.6	DESCARGA DE CAUDAL NO CAPTADO.....	71
2.2	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	71
2.2.1	CAUDALÍMETRO	71
2.2.2	VERTEDERO TRIANGULAR	72
2.2.3	LIMNÍMETRO	73
CAPITULO 3 TRABAJO EXPERIMENTAL EN AGUA CLARA.....		75
3.1	PERFIL DE FLUJO.....	75
3.2	CALADO AL INICIO DE LA REJA	80
3.3	COEFICIENTE DE DESCARGA.....	83
3.3.1	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA ESTÁTICO.....	83
3.3.2	COEFICIENTE DE DESCARGA VARIABLE A LO LARGO DE LA REJA ...	85
3.4	LONGITUD DE LA REJA.....	92
3.4.1	LONGITUD L_1	93
CAPITULO 4 ANÁLISIS EMPÍRICO, DIMENSIONAL E INSPECCIONAL.....		95
4.1	INTRODUCCIÓN.....	95
4.2	CALADO AL INICIO DE LA REJA	99
4.3	RELACIÓN DE LA LONGITUD DE LA REJA CON LOS NÚMEROS ADIMENSIONALES DE REYNOLDS Y WEBER.....	104
4.3.1	NÚMERO DE REYNOLDS	104
4.3.2	NÚMERO DE WEBER.....	106
4.4	COEFICIENTE DE DESCARGA PROMEDIO.....	107
4.4.1	PARÁMETROS PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE DESCARGA PROMEDIO EN REJAS CON BARRAS CUERPO DE PEZ	110
4.5	LONGITUD DE LA REJA.....	113
4.5.1	COMPARACIÓN CON EL TRABAJO DE DROBIR ET AL. (1999).....	115
CAPITULO 5 TRABAJO EXPERIMENTAL CONSIDERANDO ARRASTRE DE SEDIMENTOS.....		117
5.1	INTRODUCCIÓN.....	117
5.2	REJAS CON ÍNDICE DE HUECOS, $m = 0.28$	118
5.2.1	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE HUECOS EFECTIVO, m'	122

5.3	REJAS CON ÍNDICE DE HUECOS, $m = 0.60$	131
5.3.1	CONSIDERACIONES SOBRE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GRAVAS EN LAS REJAS CON BARRAS CIRCULARES	135
5.4	EFFECTO DE OBSTRUCCIÓN EN REJAS CON BARRAS CIRCULARES Y BARRAS TIPO T.....	137
5.4.1	CAPACIDAD DE DERIVACIÓN.....	137
5.4.2	FACTOR DE OBSTRUCCIÓN.....	139
CAPITULO 6 CRITERIOS Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CAPTACIONES CON REJAS DE FONDO		143
6.1	INTRODUCCIÓN.....	143
6.2	ANTES DE REALIZAR EL DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN DE FONDO	143
6.3	CONSIDERACIONES PARA REALIZAR EL DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN DE FONDO.....	144
6.3.1	TIPO DE BARRA.....	144
6.3.2	PENDIENTE LONGITUDINAL DE LA REJA.....	145
6.3.3	ESPACIAMIENTO ENTRE BARRAS DE LA REJA.....	145
6.3.4	COEFICIENTE DE DESCARGA PROMEDIO.....	146
6.3.5	FACTOR DE OBSTRUCCIÓN.....	151
CAPITULO 7 PROGRAMA DE DIMENSIONAMIENTO DE REJAS PARA CAPTACIONES DE FONDO UTILIZANDO EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN MATLAB® R2018b... 155		
7.1	INTRODUCCIÓN.....	155
7.2	METODOLOGÍA DE DISEÑO	156
7.2.1	INFORMACIÓN DEL PROYECTO Y DE LA REJA.....	156
7.2.2	CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y LONGITUD DE LA REJA	157
7.3	DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	161
7.3.1	PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA.....	161
7.3.2	INTERFAZ PARA DISEÑO EN AGUA CLARA	162
7.3.3	INTERFAZ PARA DISEÑO CONSIDERANDO SEDIMENTOS.....	169
7.4	MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA	174
7.4.1	PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA	175

7.1.1	DISEÑANDO UNA REJA PARA CAPTACIÓN DE FONDO	176
7.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	181
7.6	CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN.....	182
CAPITULO 8 APORTACIONES, CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....		183
8.1	APORTACIONES	183
8.2	CONCLUSIONES.....	184
8.2.1	SOBRE LA INFORMACIÓN RECOPIADA DE LA LITERATURA TÉCNICA 184	
8.2.2	SOBRE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON REJAS DE BARRAS CIRCULARES.....	185
8.2.3	SOBRE LA PROPUESTA DE SOFTWARE DE DIMENSIONAMIENTO ...	186
8.3	FUTUROS DESARROLLOS.....	186
APÉNDICE I DESARROLLO DE ALGUNAS EXPRESIONES RECOPIADAS DE LA LITERATURA TÉCNICA.....		189
A1.1.	GAROT (1939).....	189
A1.2.	FRANK (1956).....	192
A1.3.	NOSEDA (1956a).....	196
A1.4.	FRANK (1959).....	198
A1.5.	KROCHIN (1978)	200
APÉNDICE II RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN		203
APÉNDICE III CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN - DISREJA.....		205
A3.1.	DISREJA INTRO.....	205
A3.2.	DISREJA SEDIMENTOS	207
A3.3.	DISREJA FIGURAS	213
A3.4.	DISREJA COMPARAR	219
BIBLIOGRAFÍA.....		225

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de la implantación de la bocatoma (Castro, 2005).	7
Figura 1.2. Esquema del corte de la captación (Castro, 2005).	7
Figura 1.3. Tipos de rejas según Subramanya, 2009. (a) Rejas con barras longitudinales; (b) Rejas con barras transversales; (c) Placa perforada, y (d) Ranura de fondo.	9
Figura 1.4. Esquema de reja considerando (a) la línea de energía horizontal, y (b) paralela al fondo del canal (García, 2016).	11
Figura 1.5. Tipos de flujo sobre una reja según Subramanya y Shukla: (a) Tipo B2; (b) Tipo B1; (c) Tipo A3; (d) Tipo A2; (e) Tipo A1.	12
Figura 1.6. Perfil de flujo calculado en comparación con mediciones de laboratorio realizadas por (a) Brunella et al. (2003), y (b) Nosedá (1956b).	14
Figura 1.7. Forma de las barras consideradas por Kirschner en su expresión.	15
Figura 1.8. Secciones inicial y final que marcan la longitud de la reja según Bouvard (1953), tomado de Orth et al. (1954).	17
Figura 1.9. Tipos de perfil de reja ensayados por Orth et al. (1954), considerando $b_w = 25$ mm y $b_f = 11.3$ mm (barras tipo 1, 2 y 4), 7.3 mm (barra tipo 3); y 9.1 mm (barra tipo 5).	18
Figura 1.10. Relación q_0/q_1 de los diferentes tipos de reja ensayados por Orth et al. (1954) para la pendiente del 20%.	18
Figura 1.11. Perfil de flujo con forma de arco elíptico propuesta por Frank (1956).	19
Figura 1.12. Tipo de barras utilizadas por White et al. (1972).	24
Figura 1.13. Relación de caudal captado con respecto al caudal de aproximación para distintos índices de huecos y 1.21 m de longitud de reja (White et al., 1972).	24
Figura 1.14. Sección de las barras de la reja de fondo. $C_{qh} = 0.90$. (Drobir, 1981).	26
Figura 1.15. Coeficiente de descarga estático de acuerdo al tipo de barra que conforma la reja (Fernández-Jáuregui et al., 1991; Simmler, 1978; Sotelo, 2002).	27
Figura 1.16. Representación de las longitudes L_1 y L_2 medidas en el modelo de reja de la UPCT de acuerdo a lo planteado por Drobir et al., (1999).	28
Figura 1.17. Captación de agua a lo largo de la reja para una reja en prototipo de barras circulares de 0.15 m diámetro y pendiente del 20% (Drobir et al., 1999).	28
Figura 1.18. Representación del ángulo que forma el vector velocidad con el plano de la reja (Righetti y Lanzoni, 2008).	29
Figura 1.19. Vista transversal de las rejas utilizadas por Righetti y Lanzoni (2008)	29
Figura 1.20. Coeficiente de descarga estático, C_{q0} , en función del Número de Reynolds al inicio de la reja, Re_0 , la línea espaciada (- - -) representa los valores promedios (Brunella et al., 2003).	30

Figura 1.21. Longitudes de reja para barras circulares en función del caudal específico para $m = 0.60$ y pendiente del 20%. (García, 2016).	34
Figura 1.22. Relación entre la longitud de reja mojada, el calado crítico en función del caudal de aproximación a la reja (Castillo et al., 2018) para rejas con índice de huecos, $m = 0.60$, considerando las propuestas de diferentes investigadores.	36
Figura 1.23. Relación entre la longitud de reja mojada, el calado crítico y el índice de huecos, en función del caudal de aproximación a la reja (Castillo et al., 2018) considerando diferentes tipos de barras y coeficientes de oclusión.	37
Figura 1.24. Comparación entre los resultados obtenidos con la modelación numérica y las medidas de laboratorio (a) perfil de flujo en la reja $m = 0.22$; y (b) capacidad de derivación de la reja $m = 0.16$. (Castillo y Carrillo, 2012).	39
Figura 1.25. Resultados para coeficiente de descarga (Castillo y Carrillo, 2012).	39
Figura 1.26. Comparación entre los resultados obtenidos con modelación numérica y en laboratorio para la reja $m = 0.22$ (a) perfil de flujo; y (b) capacidad de derivación. (Castillo et al., 2013a).	40
Figura 1.27. Comparación de los resultados obtenidos para el coeficiente de descarga para rejas con diferente índice de huecos (Castillo et al., 2013a).	40
Figura 1.28. Capacidad de derivación de la reja de captación considerando diferentes concentraciones de sedimentos para $m = 0.16$ (Castillo et al., 2013a).	41
Figura 1.29. Perfiles de flujo en espacio entre barras (L_1) y sobre barra (L_2) para una pendiente longitudinal de 20%, $m = 0.60$ y diferentes caudales de aproximación. (Castillo et al., 2013b).	42
Figura 1.30. Perfiles de flujo L_1 y L_2 con agua clara y 5% de concentración de sedimentos para $q = 1.36 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, pendiente longitudinal de 20% y $m = 0.23$ (Castillo et al., 2013b).	42
Figura 1.31. Secciones transversales de los perfiles ensayados (Hosseini et al., 2015).	43
Figura 1.32. Detalle del dominio de flujo (Carrillo, et al., 2018a).	44
Figura 1.33. Perfil de flujo sobre la reja con 30% de pendiente longitudinal (Carrillo et al., 2018a).	45
Figura 1.34. Capacidad de derivación para una reja con pendiente longitudinal de 30% (Carrillo et al., 2018a).	45
Figura 1.35. Comparación del coeficiente de descarga obtenido con ANSYS CFX y con mediciones en laboratorio para una pendiente longitudinal del 30% (Carrillo et al., 2018a; García, 2016).	46
Figura 1.36. Modelo físico (a) esquema en planta del modelo físico; y (b) fotografía del modelo construido (Wong, 2009).	47
Figura 1.37. Longitudes que caracterizan el flujo en la reja (a) L_w , y (b) L_{w1} y L_{w2} (Wong, 2009). ..	48
Figura 1.38. Esquemas de la longitud L_w cuando (a) el flujo ingresa directamente a la galería de captación, y (b) el flujo continúa por el canal hacia una galería de captación (Wong, 2009).	49
Figura 1.39. Ejemplo de secciones de flujo adherido a la parte inferior de las barras de la reja (Wong, 2009).	49

Figura 1.40. Configuración de la malla para realizar la modelación numérica: (a) vista en planta; y (b) sección transversal (Wong, 2009).	50
Figura 1.41. Configuración de la malla empleada en la modelación numérica y detalle de las secciones transversales de reja.	52
Figura 1.42. Perfil de flujo (a) en laboratorio; y (b) con modelación numérica. (Chan y Lee, 2018).	53
Figura 1.43. Esquemas de obras de captación propuestas en función de la cantidad de sedimentos según Drobir (1981).	58
Figura 1.44. Tipos de barras para captaciones de fondo.	60
Figura 1.45. Perfil de barras para captaciones con reja de fondo según Andaroodi y Schleiss (2006) (a) barra rectangular (no recomendada), (b) barra con parte superior tipo bulbo, y (c) barra con la parte circular en forma de cilindro (recomendada).	61
Figura 1.46. Curvas granulométricas de las gravas empleadas por García (2016).	62
Figura 1.47. Longitud de reja mojada para diferentes caudales entrantes y en función de la pendiente longitudinal de la reja obtenida por García (2016).	63
Figura 1.48. Índice de huecos efectivo para el caso de la reja $m = 0.28$ y grava 2 (Castillo et al., 2016).	64
Figura 1.49. Ajuste lineal propuesto para obtener el valor del índice de huecos efectivo para rejillas con barras tipo T (Castillo et al., 2016).	65
Figura 2.1. Esquema del sistema de captación de reja de fondo construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT.	67
Figura 2.2. Configuración de las rejillas con barras circulares.	69
Figura 2.3. Esquema del vertedero triangular.	72
Figura 2.4. Gráfico comparativo entre los valores de caudal medidos en laboratorio y los valores calculados con la ecuación (2.1) (USBR).	73
Figura 2.5. Perfil de la lámina de agua para un caudal de $0.198 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y una pendiente del 20% (a) Desarrollo total del perfil, y (b) detalle de la proyección de los calados perpendiculares al plano de la reja en la zona de la reja inclinada.	76
Figura 3.1. Calado perpendicular al plano de la reja, adimensionalizado con el calado crítico en función del factor $(x/h_c)mC_{q0}$ para la reja con $m = 0.28$ (mediciones realizadas sobre barra).	77
Figura 3.2. Calado perpendicular al plano de la reja, adimensionalizado con el calado crítico en función del factor $(x/h_c)mC_{q0}$ para la reja con $m = 0.60$ (mediciones realizadas sobre barra).	77
Figura 3.3. Detalle del calado perpendicular al plano de la reja adimensionalizado desde el inicio de la reja para las rejillas con barras circulares e índices de huecos, $m = 0.28$ y 0.60	78

Figura 3.4. Familia de curvas resultado de los ajustes propuestos para el perfil de la lámina de flujo en rejas con barras circulares y $m = 0.28$.	79
Figura 3.5. Familia de curvas resultado de los ajustes propuestos para el perfil de la lámina de flujo en rejas con barras circulares y $m = 0.60$.	79
Figura 3.6. Gráfica del calado al inicio de la reja en función del calado crítico para rejas con barras circulares.	81
Figura 3.7. Gráfica del calado al inicio de la reja en función del calado crítico para rejas con barras circulares, diferenciando los valores por pendiente longitudinal de reja, para $m =$ (a) 0.28; y (b) 0.60.	81
Figura 3.8. Gráfica del calado al inicio de la reja en función del calado crítico y ajustes lineales propuestos para diferentes pendientes: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30%; y (e) 33%.	82
Figura 3.9. Comparación entre los valores de calado al inicio de la reja obtenidos con las ecuaciones (1.27) y (3.2) para dos pendientes diferentes: (a) 0%; y (b) 33%.	83
Figura 3.10. Coeficiente de descarga estático obtenido en laboratorio (a) $C_{q0} \approx 1.1646$ para la reja con $m = 0.28$, y (b) $C_{q0} \approx 0.8997$ para la reja con $m = 0.60$.	84
Figura 3.11. Esquema de la utilización de la lámina de metal para la medición del caudal captado por tramos: (a) primer tramo de 0.05 m, y (b) tercer tramo de 0.15 m.	85
Figura 3.12. Energía total a lo largo de la reja para un caudal $q_1 = 155.5$ l/s/m y pendientes longitudinales de reja (a) del 10%, y (b) del 30%.	86
Figura 3.13. Variación de $C_{qH}(x)$ en función del parámetro $(x/h_c)m$ para rejas circulares con índices de huecos (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.	87
Figura 3.14. Variación de $C_{qH}(x)$ en función del parámetro $(x/h_c)m$ y tendencia de los ajustes propuestos para las rejas circulares con índices de huecos (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.	88
Figura 3.15. Comparación entre valores medidos en laboratorio y calculados con las ecuaciones (1.71) y (3.7) del perfil de flujo y del porcentaje de caudal acumulado para $m = 0.28$.	89
Figura 3.16. Comparación entre valores medidos en laboratorio y calculados con las ecuaciones (1.71), (3.8) y (3.9) del perfil de flujo y del porcentaje de caudal acumulado para $m = 0.60$.	90
Figura 3.17. Comparación del coeficiente de descarga a lo largo de reja para $m = 0.28$ y $tg\theta = 10\%$ (Carrillo et al., 2018b).	91
Figura 3.18. Comparación del coeficiente de descarga a lo largo de reja para $m = 0.28$ y $tg\theta = 30\%$ (Carrillo et al., 2018b).	91
Figura 3.19. Gráfica de la longitud máxima entre dos barras, L_1 en función del caudal de aproximación para las rejas (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.	93
Figura 3.20. Comparación entre los valores de L_1 experimentales y calculados para $m = 0.28$.	94
Figura 3.21. Comparación entre los valores de L_1 experimentales y calculados para $m = 0.60$.	94
Figura 4.1. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares y con índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).	100

Figura 4.2. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares y con índice de huecos, $m = 0.60$ (García et al., 2018a).....	100
Figura 4.3. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T y con índice de huecos, $m = 0.16$ (García et al., 2018a).....	101
Figura 4.4. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T y con índice de huecos, $m = 0.22$ (García et al., 2018a).....	101
Figura 4.5. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T y con índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).....	101
Figura 4.6. Número de Froude al inicio de la reja, Fr_0 , en función de la longitud mojada, L_2 para rejas con barras: (a) circulares y $m = 0.28$; (b) circulares y $m = 0.60$; (c) tipo T y $m = 0.16$, (d) tipo T y $m = 0.22$; y (e) tipo T y $m = 0.28$ (García et al., 2018a).....	103
Figura 4.7. Número de Reynolds al inicio de la reja, Re_0 , en función de la longitud mojada, L_2 : (a) rejas con barras circulares y $m = 0.28$; (b) rejas con barras circulares y $m = 0.60$; (c) rejas con barras tipo T y $m = 0.16$, (d) rejas con barras tipo T y $m = 0.22$; y (e) rejas con barras tipo T y $m = 0.28$ (García et al., 2018a).....	105
Figura 4.8. Número de Weber al inicio de la reja, We_0 , en función de la longitud mojada, L_2 para rejas con barras: (a) circulares y $m = 0.28$; (b) circulares y $m = 0.60$; (c) tipo T y $m = 0.16$, (d) tipo T y $m = 0.22$; y (e) tipo T y $m = 0.28$ (García et al., 2018a).....	107
Figura 4.9. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares e índice de huecos, $m = 0.60$ (García et al., 2018a).....	109
Figura 4.10. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares e índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018 ^a).....	109
Figura 4.11. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T e con índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).....	109
Figura 4.12. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T e con índice de huecos, $m = 0.22$ (García et al., 2018a).....	110
Figura 4.13. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T e con índice de huecos, $m = 0.16$ (García et al., 2018a).....	110
Figura 4.14. Longitud L para rejas con barras cuerpo de pez, pendiente del 20% y caudal de aproximación de 60 l/s (Orth et al., 1954).....	111
Figura 4.15. Coeficientes de descarga estáticos calculados con la ecuación (4.12) y valores propuestos por Frank (1956) para los diferentes tipos de barras de reja considerados.	112
Figura 4.16. Gráfico del parámetro a en función de m para rejas con barras tipo T (+), circulares (O).	112
Figura 4.17. Gráfica de la longitud mojada de la reja, L , en función del caudal de aproximación para las rejas con barras circulares e índice de huecos (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$	113
Figura 4.18. Comparación entre los valores medidos en laboratorio y los calculados para L	114

Figura 4.19. Comparación de longitudes de reja calculadas con la ecuación (4.16) y las propuestas por Drobir et al. (1999) para L_1 y L_2 , incluyendo las mediciones del prototipo (García et al., 2018a).	116
Figura 5.1. Dimensiones de los elipsoides según Zingg (1935).	118
Figura 5.2. Curvas granulométricas para la grava $d_{50} = 22.0$ mm (a) considerando la dimensión b del elipsoide, y (b) considerando la dimensión c del elipsoide.	118
Figura 5.3. Depósito de gravas sobre la reja con pendiente del 30% para un caudal de aproximación de 0.1383 m ³ /s/m. (a) Vista lateral, y (b) Vista superior.	120
Figura 5.4. Porcentaje de caudal derivado en función de la pendiente longitudinal de la reja. (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	121
Figura 5.5. Longitud de contacto grava – barra en el caso de rejas con barras graficadas desde la que no es recomendable hacia la que resultaría óptima: (a) circulares; (b) cuerpo de pez; y (c), (d), (e) y (f) prismáticas con los bordes redondeados.	121
Figura 5.6. Esquema de la reja ocluída para la determinación del índice de huecos efectivo	122
Figura 5.7. Vista superior de las rejas ocluidas para $q_1 = 0.1383$ m ³ /s/m y diversas pendientes longitudinales. (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 33%, y (f) 35%.	123
Figura 5.8. Vista superior de las rejas ocluidas para $q_1 = 0.198$ m ³ /s/m y diversas pendientes longitudinales. (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 33%, y (f) 35%.	124
Figura 5.9. Vista superior de las rejas ocluidas, dividiendo la reja en cuatro partes y con el índice de huecos calculado para cada parte, para: (a) $q_1 = 0.1555$ m ³ /s/m y $\text{tg } \theta = 10\%$, y (b) $q_1 = 0.198$ m ³ /s/m y $\text{tg } \theta = 35\%$. (García et al., 2018b).	125
Figura 5.10. Índice de huecos calculado utilizando fotografías y un software de dibujo, para diferentes pendientes y caudales de aproximación.	125
Figura 5.11. Flujo sobre la reja ocluida y formación de estelas en las gravas retenidas para pendientes longitudinales de (a) 20%, (b) 30%.	126
Figura 5.12. Índice de huecos efectivo, m' , para diferentes pendientes y caudales de aproximación.	127
Figura 5.13. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos en laboratorio para la pendiente del 0% y $q_1 =$ (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	129
Figura 5.14. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para la pendiente del 10% y $q_1 =$ (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	129
Figura 5.15. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para una pendiente del 20% y $q_1 =$ (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	129

Figura 5.16. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para una pendiente del 30% y $q_1 =$ (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	130
Figura 5.17. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para una pendiente del 33% y $q_1 =$ (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	130
Figura 5.18. Perfil de flujo sobre la reja calculado para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos en laboratorio para una pendiente del 35% y $q_1 =$ (a) 0.1146 m ³ /s/m, (b) 0.1383 m ³ /s/m, (c) 0.1555 m ³ /s/m, y (d) 0.198 m ³ /s/m.	131
Figura 5.19. Curvas granulométricas para la grava $d_{50} = 58.0$ mm (a) considerando la dimensión b del elipsoide, y (b) considerando la dimensión c del elipsoide.	131
Figura 5.20. Uso de la lámina metálica para reducir la longitud original de la reja: (a) longitud mínima utilizada, y (b) longitud máxima utilizada.	132
Figura 5.21. Porcentaje de caudal derivado en función de la pendiente longitudinal para diferentes caudales de entrada, q_1 (a) 155.5 l/s/m, (b) 198.0 l/s/m, y (c) 250.0 l/s/m.	134
Figura 5.22. Vista superior de las rejillas ocluidas para $q_1 = 250$ l/s/m y (a) $tg\theta = 10\%$ y $L_m = 0.35$ m, (b) $tg\theta = 20\%$ y $L_m = 0.35$ m, (c) $tg\theta = 30\%$ y $L_m = 0.40$ m, y (d) $tg\theta = 35\%$ y $L_m = 0.45$ m.	135
Figura 5.23. Vista superior de las rejillas ocluidas para $q_1 = 0.1555$ m ³ /s/m y (a) $tg\theta = 10\%$ y $L_m = 0.25$ m, (b) $tg\theta = 20\%$ y $L_m = 0.25$ m, (c) $tg\theta = 30\%$ y $L_m = 0.30$ m, y (d) $tg\theta = 35\%$ y $L_m = 0.35$ m.	135
Figura 5.24. Comparación de caudal derivado con rejillas de barras tipo T (grava 2 y 3) y barras circulares (grava 3) para $q_1 =$: (a) 114.6 l/s/m, (b) 138.3 l/s/m, y (c) 155.5 l/s/m (García et al., 2018b).	138
Figura 5.25. Comparación de m' en función del caudal derivado para rejillas con barras tipo T (grava 2 y 3) y barras circulares (grava 3) para una pendiente longitudinal del 33% (García et al., 2018b).	138
Figura 5.26. Comparación entre el porcentaje de material depositado en función de la pendiente longitudinal para rejillas con barras tipo T y barras circulares con $q_1 = 138.3$ l/s/m (García et al., 2018b).	139
Figura 5.27 Gráfico de los factores de obstrucción de la reja circular $m = 0.28$ en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$	140
Figura 5.28. Gráfico de los factores de obstrucción de la reja tipo T en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ para las pendientes: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, y (e) 33%.	142
Figura 6.1 Tipos de barra recomendados para captaciones con reja de fondo para agua clara y para flujo con transporte de sedimentos.	144
Figura 6.2 Gráfico del parámetro a en función de m para rejillas con barras tipo T (+), circulares (O) y cuerpo de pez (Δ).	146

Figura 6.3 Gráfico del parámetro b en función de m para rejas con barras tipo T (+), circulares (O) y cuerpo de pez (Δ).	147
Figura 6.4 Parámetros de diseño en función del caudal específico de captación y la pendiente longitudinal para una reja con barras tipo T y $m = 0.16$. (a) C_{qH} , y (b) Longitud de reja.	148
Figura 6.5 Parámetros de diseño en función del caudal específico de captación y la pendiente longitudinal para una reja con barras cuerpo de pez y $m = 0.30$ (a) C_{qH} , y (b) Longitud de reja... ..	148
Figura 6.6 Parámetros de diseño en función del caudal específico de captación y la pendiente longitudinal para una reja con barras circulares y $m = 0.63$. (a) C_{qH} , y (b) Longitud de reja.	149
Figura 6.7 Ábaco de $C_{qH}(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras tipo T....	149
Figura 6.8 Ábaco de $C_{qH}(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras circulares.	150
Figura 6.9 Ábaco de $C_{qH}(1+tg\theta)$ en función de q para rejas con barras cuerpo de pez.	150
Figura 6.10 Ábaco de $L/(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras tipo T. ...	150
Figura 6.11 Ábaco de $L/(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras circulares.	151
Figura 6.12 Ábaco de $L/(1+tg\theta)$ en función de q para rejas con barras cuerpo de pez.....	151
Figura 6.13 Factores de obstrucción de la reja con barras tipo T en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ para las pendientes: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, y (e) 33%.	152
Figura 6.14 Factores de obstrucción de la reja con barras circulares y $m = 0.28$ en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ y propuesta del valor promedio de f (.....).	154
Figura 7.1 Vista del entorno de diseño de la interfaz gráfica utilizando GUIDE.	155
Figura 7.2 Esquema de los elementos que se consideran para realizar el diseño de una reja para captación de fondo.	156
Figura 7.3 Esquema de las longitudes L_1 y L_2 , propuestas por Drobir et al. (1999).	159
Figura 7.4 Diseño de la Interfaz de presentación del programa en GUIDE.....	162
Figura 7.5 Presentación de la pantalla introductoria cuando se ejecuta el programa en español.	162
Figura 7.6 Diseño de la interfaz gráfica de diseño de la reja en agua clara.	163
Figura 7.7 Diseño de las secciones (a) “Figuras”, y (b) “Comparar”	163
Figura 7.8 Detalle del diseño de la sección de Información del Proyecto.	164
Figura 7.9 Presentación de la sección de Información del Proyecto cuando se ejecuta el programa de cálculo en español.....	164
Figura 7.10 Detalle del diseño de la sección de Información de la Reja.	165
Figura 7.11 Presentación de la sección Información de la Reja.....	165
Figura 7.12 Detalle del diseño de la sección de Parámetros Hidráulicos para agua clara.	165

Figura 7.13 Presentación de la sección Parámetros Hidráulicos.	165
Figura 7.14 Detalle de las opciones de ejecución del programa.	166
Figura 7.15 Presentación de la pantalla de programa cuando se ejecuta “Calcular”.	166
Figura 7.16 Presentación de las figuras de perfil de flujo y caudal derivado cuando se ejecuta “Figuras” para el caso de barras con sección circular.	167
Figura 7.17 Opciones que presenta la ejecución de “Comparar”.	168
Figura 7.18 Diseño de la interfaz gráfica para diseño considerando sedimentos, en inglés.	170
Figura 7.19 Diseño de las secciones (a) “Figures”, y (b) “Compare”, en inglés	170
Figura 7.20 Presentación de la sección Información del Proyecto, en inglés.	171
Figura 7.21 Presentación de la sección Información de la Reja, en inglés.	171
Figura 7.22 Presentación de la sección Parámetros Hidráulicos, en inglés.	171
Figura 7.23 Detalle de las opciones de ejecución del programa, en inglés.	172
Figura 7.24 Presentación de la pantalla de programa cuando se ejecuta “Run”.	172
Figura 7.25 Presentación de las figuras de perfil de flujo y caudal derivado cuando se ejecuta “Figures” para el caso de barras con sección circular.	173
Figura 7.26 Opciones que presenta la ejecución de “Compare”.	174
Figura 7.27 Pantalla de presentación del programa y opciones: (a) menú despegable, (b) pantalla en español, y (c) pantalla en inglés.	175
Figura 7.28 Pantalla de presentación cuando se ejecuta la opción “Acerca de / About”.	175
Figura 7.29 Pantalla de presentación cuando se ejecuta la opción “Salir / Exit”.	176
Figura 7.30 Presentación del menú desplegable cuando se ejecuta la opción “Idioma / Language”.	176
Figura 7.31 Secciones de información para diseño en agua clara.	177
Figura 7.32 Sección Información del Proyecto con sus campos completos. Pantalla de diseño considerando sedimentos.	177
Figura 7.33 Opciones de selección de tipo de barra.	178
Figura 7.34 Sección Información de la Reja con sus campos completos.	178
Figura 7.35 Mensajes de alerta sobre información incompleta en las secciones introductorias del programa.	179
Figura 7.36 Comparación de las longitudes obtenidas con el programa y aquellas proporcionadas por los estudios de diseño (a) en agua clara, y (b) considerando arrastre de sedimentos.	181
Figura 7.37 Relación de longitud de reja sobre calado crítico en función del caudal de captación para (a) $m = 0.60$ y pendiente del 20; diseño con agua clara y barras circulares, y (b) $m = 0.28$ y pendiente del 30%; diseño considerando arrastre de sedimentos y barras tipo T.	182

Figura 8.1 Esquema de perfiles de barra óptimos que pueden utilizarse para el diseño de una captación de fondo (a) en caso de agua clara, (b) en caso de flujo con sedimentos, y (c) esquema de la longitud de contacto grava – barra para visualizar la influencia del radio del perfil circular en la oclusión de rejillas circulares (García et al., 2018b)..... 187

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1.1. Río de montaña en el Páramo del Sincholagua – Ecuador, (a) Tamaño de los sólidos transportados por el río; (b) Ubicación en el mapa de Ecuador.	1
Fotografía 1.2. Sistemas de captación de reja de fondo construidas como parte del Proyecto Hidroeléctrico Mazar – Dudas: (a) Aprovechamiento Dudas; (b) Aprovechamiento San Antonio (Imagen cortesía de CELEC EP Hidroazogues), y (c) Ubicación en el mapa de Ecuador.....	2
Fotografía 1.3. Proyecto Chalpi (a) zona de captación y desarenadores («Megaproyecto Chalpi Grande – Papallacta», 2019); (b) Ubicación en el mapa de Ecuador.	3
Fotografía 1.4. Proyecto Hidroeléctrico Mazar - Dudas (a) Labores de mantenimiento en la captación del aprovechamiento San Antonio (Imagen cortesía de CELEC EP Hidroazogues), y (b) Detalle de la oclusión de la reja con rocas y ramas.	4
Fotografía 1.5. Estado de las captaciones de fondo en Bolivia (a) taponamiento de la reja en la toma Apote, y (b) reja extraída de la estructura en Laimiña (Programa Nacional de Riego, 2002).	5
Fotografía 2.1. Sistema de captación de reja de fondo construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT.	67
Fotografía 2.2. Arqueta de toma (a) Vista frontal, y (b) Vista superior.	68
Fotografía 2.3. Canal de aproximación.	68
Fotografía 2.4. Reja de fondo (a) Reja con barras tipo T ($m = 0.16$), y (b) Reja con barras circulares ($m = 0.28$).	69
Fotografía 2.5. (a) Canal de recogida de caudales captados, y (b) conducción al desarenador. ...	70
Fotografía 2.6. Desarenador (a) Vista frontal, y (b) Vista superior de la cámara.	71
Fotografía 2.7. Descarga del caudal rechazado (a) Vista lateral, (b) Pared de ladrillo perforado, y (c) Canal de descarga.	71
Fotografía 2.8. Caudalímetro electromagnético Endress Häuser.....	72
Fotografía 2.9. Limnómetro instalado sobre el dispositivo móvil en el canal de aproximación.	74
Fotografía 2.10. Longitudes L_1 y L_2 propuestas por Drobir et al. (1999).	92
Fotografía 3.1. Formación del embalse provisional sobre la reja para la estimación del coeficiente de descarga estático de la reja.	84
Fotografía 5.1. Sistema para recoger el material sólido rechazado (a) jaula de recolección, y (b) mecanismo para levantar y depositar la jaula en el pozo de descarga.	119
Fotografía 5.2. Ensayo con gravas (a) flujo de agua con sedimentos, y (b) reja ocluida después de un ensayo.	119

Fotografía 5.3. Efecto de retención sobre la longitud original de la reja: (a) con circulación de caudal, y (b) resultado final de la grava depositada sobre la reja. 132

Fotografía 5.4. Flujo sobre la reja para el caudal de aproximación de 155.5 l/s/m y diferentes pendientes: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 33%, y (e) 35%. 133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características de los sistemas de captación con reja de fondo del Proyecto Chalpi (ASTEC Cía. Ltda., 2012).	3
Tabla 1.2. Ejemplos de Proyectos Hidroeléctricos en fase de estudios en Ecuador.....	4
Tabla 1.3. Características de los sistemas de captación construidos en Bolivia (Programa Nacional de Riego, 2002).	5
Tabla 1.4. Tipo de flujo sobre las rejillas según Subramanya y Shukla.	13
Tabla 1.5. Coeficiente de forma, β , propuesto por Kirschner (Hernández, 2001).	15
Tabla 1.6. Coeficiente de descarga según Garot, para los distintos tipos de barras calculados para valores de $b_1 = 15$ cm y $b_w = 10$ cm.	16
Tabla 1.7. Coeficiente de descarga estático obtenido por Garot para la barra de forma b.	16
Tabla 1.8. Longitud de reja mojada medida en laboratorio y calculada (Orth et al., 1954).	19
Tabla 1.9. Parámetros de estudio (Bina y Saghi, 2017).	35
Tabla 1.10. Consideraciones realizadas para la modelación numérica.....	38
Tabla 1.11. Clasificación de Zingg (1935) para la forma de las partículas utilizadas con la reja con barras tipo T ($m = 0.22$ y 0.28).	62
Tabla 2.1. Características geométricas de las rejillas.	70
Tabla 2.2. Comparación de valores de caudal medidos en laboratorio con respecto a los valores obtenidos utilizando la ecuación 2.1.	73
Tabla 3.1. Coeficientes c , d , e , y f para la reja con índice de huecos, $m = 0.28$	79
Tabla 3.2. Coeficientes c , d , e , y f para la reja con índice de huecos, $m = 0.60$	79
Tabla 3.3. Plan de ensayos realizados en el laboratorio de la UPCT para determinar el calado al inicio de la reja.....	80
Tabla 3.4. Coeficientes i y j de la ecuación (3.2)	81
Tabla 3.5. Comparación de los valores de C_{q0} obtenidos con información de laboratorio y calculados con la ecuación (1.72)	84
Tabla 3.6. Ensayos realizados para determinar las longitudes L_1 y L de la reja.	92
Tabla 4.1. Ensayos realizados para determinar el calado al inicio de la reja.	97
Tabla 4.2. Ensayos realizados para determinar la longitud mojada de la reja.	97
Tabla 4.3. Magnitudes de las variables no consideradas repetitivas.....	98
Tabla 4.4. Parámetro n del ajuste propuesto para calcular el calado al inicio de la reja, h_o , en función del caudal de aproximación.....	100

Tabla 4.5. Influencia de las fuerzas viscosas en el calado al inicio de la reja.	102
Tabla 4.6. Influencia de la viscosidad en la longitud mojada, L_2 , de la reja.	104
Tabla 4.7. Parámetro ϕ del ajuste propuesto para calcular el Número de Reynolds al inicio de la reja, Re_o , en función de la longitud de la reja.	106
Tabla 4.8. Parámetro s del ajuste propuesto para calcular el Número de Weber al inicio de la reja, We_o , en función de la longitud de la reja.	106
Tabla 4.9. Parámetros a y b del ajuste propuesto en la ecuación (4.11) para calcular coeficiente de descarga promedio.	108
Tabla 4.10. Parámetros calculados para la información de Orth et al. (1954)	110
Tabla 4.11. Valores de los parámetros C_{q0} , a y b calculados para la información de Orth et al. (1954)	112
Tabla 4.12. Parámetros de la ecuación (4.15) en función del caudal específico de captación.	114
Tabla 5.1. Clasificación de Zingg (1935) para la forma de las partículas utilizadas con la reja de barras circulares ($m = 0.28$).	118
Tabla 5.2. Porcentaje de caudal derivado.	120
Tabla 5.3. Valores promedio del índice de huecos calculado a partir de fotografías.	125
Tabla 5.4. Índice de huecos efectivo, m' , calculado a partir de las ecuaciones (1.97) y (3.6)	128
Tabla 5.5. Valores promedio del índice de huecos efectivo, m' , y porcentaje con respecto al valor inicial de m	128
Tabla 5.6. Clasificación de Zingg (1935) para la forma de las partículas con la reja de barras circulares ($m = 0.60$).	132
Tabla 5.7. Valores de m propuestos como ejemplos en la literatura técnica.	133
Tabla 5.8. Porcentaje de caudal derivado.	134
Tabla 6.1 Resumen de valores de espaciamiento entre barras recomendados en la literatura técnica.	145
Tabla 6.2 Resumen de los valores de f propuestos para cada pendiente longitudinal de la reja.	153
Tabla 6.3 Resumen de valores promedio y máximos de f	153
Tabla 7.1 Información para realizar el dimensionamiento de la reja.	156
Tabla 7.2 Valores del coeficiente f para los tipos de barra considerados en el programa.	159
Tabla 7.3 Opciones de ejecución del programa.	179

SIMBOLOGÍA

Letras Latinas en Minúscula:

a, b, c	[L]	dimensiones de un sólido según Zingg (1935)
$a, b, c, d, e, k, l, o, s, w$	[-]	coeficientes y exponentes de curvas de ajuste ecuaciones propuestas por García et al. (2018a).
a, b_0, b_a	[-]	constantes determinadas experimentalmente por Righetti y Lanzoni (2008)
b	[L]	ancho de un canal rectangular
b_1	[L]	espaciamiento entre dos barras paralelas de reja
b_{1L}	[L]	espaciamiento entre las barras longitudinales de la grilla de fondo (Bina y Saghi, 2017)
b_{1L}	[L]	espaciamiento entre las barras transversales de la grilla de fondo (Bina y Saghi, 2017)
b_c	[L]	distancia entre los dos interejos longitudinales de dos barras paralelas
b_w	[L]	ancho de la barra que conforma la reja
d_{50}	[L]	mediana de la curva granulométrica (con respecto a la dimensión b de Zingg) de los sedimentos (sólidos)
d_{50c}	[L]	mediana de la curva granulométrica en cuanto a la dimensión c (de Zingg) de los sedimentos.
c	[-]	coeficiente de contracción considerado por Frank (1956)
f	[-]	coeficiente de obstrucción de Krochin (1978)
f_0	[-]	alusión al coeficiente de obstrucción de Krochin para cálculo en agua clara (igual a cero)
f, f_{calc}	[-]	factor que introduce el efecto de la posible oclusión por arrastre de material sólido del río en la longitud mojada de reja
g	[L/T ²]	aceleración de la gravedad
h	[L]	calado perpendicular al plano de la reja
h_0 ó h_1	[L]	calado perpendicular al plano de la reja medido al inicio de la reja
h_2	[L]	calado perpendicular al plano de la reja medido al final de la reja
h_c	[L]	calado crítico
h_s	[L]	profundidad de sumergencia de la galería de captación
i	[-]	pendiente longitudinal de la reja, equivalente a $tg\theta$
k	[-]	coeficiente experimental usado por De Marchi (1947) para caracterizar el perfil de flujo

k	[-]	factor de reducción del área total de la reja en área efectiva disponible de Krochin (1978)
k_0	[-]	alusión al factor de reducción del área total de la reja en área efectiva disponible de Krochin para agua clara
k_f	[-]	factor de corrección que aproxima el calado crítico al calado al inicio de la reja
l	[L]	longitud del intereje, equivale a la suma del ancho de la barra y el espacio entre barras
m	[-]	índice de huecos, equivale a la relación del área hueca con respecto al área total de la reja
m'	[-]	índice de huecos efectivo después de considerar la oclusión producida en la reja
q	[L ³ /T/L]	caudal específico que circula por un punto determinado de la reja
q_0 ó q_1	[L ³ /T/L]	caudal específico en el canal de aproximación a la reja
q_2	[L ³ /T/L]	caudal específico rechazado por la reja
q_d	[L ³ /T/L]	caudal específico derivado, captado por la reja en un punto.
t	[L]	espesor de la barra que conforma la reja
v_1	[L/T]	velocidad perpendicular al plano de la reja y sobre la hendidura sin pasar a través de ella
v_2	[L/T]	velocidad de flujo a través de las barras
x	[L]	coordenada longitudinal medida sobre el plano de la reja
y	[L]	coordenada de posición en un plano vertical
y_0	[L]	calado de aproximación a la reja (Bina y Saghi, 2017)
z	[L]	distancia vertical de un plano de referencia al plano de la reja

Letras Latinas en Mayúscula:

B	[-]	ancho del canal de aproximación o de la reja de fondo
C_c	[-]	coeficiente de contracción
C_D	[-]	coeficiente de arrastre de la grava
C_0	[-]	parámetro empleado por Krochin para determinar el coeficiente de descarga
C_q	[-]	coeficiente de descarga en análisis dimensional
C_{qh}	[-]	coeficiente de descarga calculado en función del calado
C_{qH}	[-]	coeficiente de descarga calculado en función de la altura de energía
$C_{qh}(h)$	[-]	coeficiente de descarga calculado en función del calado para una sección de calado
$C_{qH}(x)$	[-]	coeficiente de descarga calculado en función de la altura de energía para una sección x
C_{q0} ó C_{qH0}	[-]	coeficiente de descarga estático
C_v	[-]	coeficiente de velocidad
D_0	[L]	profundidad hidráulica
F_{D0}	[ML/T ²]	Fuerza de arrastre
Fr	[-]	Número de Froude
Fr_0	[-]	Número de Froude al inicio de la reja
F_{H0}	[-]	número de Froude modificado según Righetti y Lanzoni (2008)
H	[L]	altura de energía medida en m
H	[L]	profundidad de la galería de captación, medida en la mitad del ancho desde el punto más bajo (Kumar et al., 2010)
H_{min}	[L]	altura de energía mínima
H_0	[L]	altura de energía medida al inicio de la reja
I_f	[-]	pendiente de la línea de energía
I_0	[-]	pendiente del fondo del canal
I_w	[-]	pendiente de la superficie libre del agua
K_2	[-]	constante de Vargas (1998)
L	[L]	longitud de reja medida en la dirección longitudinal de la reja.
L_1	[L]	representa la longitud máxima que alcanza la lámina de agua entre dos barras
L_2	[L]	máxima longitud mojada sobre la reja
N	[L]	calado perpendicular al plano de la reja según Brunella et al. (2003)

Q_1	$[L^3/T]$	caudal de aproximación
Q_2	$[L^3/T]$	caudal que alcanza el final de la reja
Q_{cap}	$[L^3/T]$	caudal que debe considerarse para el diseño de la galería de captación, conducción al desarenador y desarenador.
Re	$[-]$	número de Reynolds
Re_0	$[-]$	Número de Reynolds al inicio de la reja
Re^*	$[-]$	Número de Reynolds límite para el inicio de movimiento de las partículas sólidas
U_0	$[L/T]$	velocidad media al inicio de la reja
U_L	$[L/T]$	componente de velocidad en la dirección de flujo
W	$[ML/T^2]$	peso promedio de las partículas que pueden ser retenidas en la reja
W	$[L]$	ancho de la galería en el sentido del flujo (Kumar et al., 2010)
We	$[-]$	Número de Weber
We_0	$[-]$	Número de Weber al inicio de la reja
X	$[L]$	coordenada longitudinal al plano de la reja adimensionalizada con el calado crítico según Brunella et al. (2003)
Z	$[L]$	coordenada perpendicular al plano de la reja adimensionalizada con el calado crítico según Brunella et al. (2003)
Z_b	$[L]$	elevación del fondo del canal (Zerihun. 2015)
Z'_b, Z''_b, Z'''_b	$[-]$	primera, segunda y tercera derivada del perfil del fondo (Zerihun, 2015)

Letras griegas:

α	[-]	coeficiente de Coriolis
β	[-]	coeficiente de Boussinesq
β	[-]	coeficiente de forma en función del tipo de barra según Kirschner
γ	[M/L ² /T ²]	peso específico
$\Phi(h/H)$	[-]	función para la definición de la longitud de la reja mojada de Garot (1939)
ϕ	[°]	ángulo que el vector velocidad forma con el plano de la reja en la hendidura
λ	[-]	coeficiente de descarga calculado en función del calado
μ	[M/L/T]	viscosidad dinámica del agua
μ	[-]	coeficiente que depende de la forma de la barra según Frank (1956)
ν	[L ² /T]	viscosidad cinemática del agua
θ	[°]	ángulo de inclinación longitudinal de la reja
Θ	[-]	parámetro adimensional de Shields del esfuerzo de corte crítico en el fondo del canal
ρ	[M/L ³]	densidad del agua
σ	[M/T ²]	tensión superficial del agua
σ_g	[-]	desviación estándar de las partículas de sedimentos
ψ	[-]	función introducida por Dagan (1963) para el cálculo de la longitud de reja mojada
Ω	[-]	coeficiente que depende de la magnitud del cambio en la fuerza específica del flujo principal y del caudal de salida (Zerihun, 2015)

RESUMEN

Los sistemas de captación de fondo se han utilizado para derivar agua en zonas de ríos de montaña caracterizados por tener fuertes pendientes longitudinales y gran variación de caudales con alto contenido de sedimentos (Krochin, 1978), probando ser alternativas técnicas y económicas por su bajo costo de operación y mantenimiento. La eficiencia de este tipo de captaciones también se ha estudiado en regiones semiáridas para aprovechar caudales de escorrentía en tiempos de lluvias (Castillo y Lima, 2010; Castillo et al., 2016; García, 2016).

A pesar de los estudios que se han realizado para caracterizar el comportamiento de flujo en estos sistemas, aún se mantienen algunas interrogantes como la influencia de la geometría de la reja en la definición del coeficiente de descarga o el efecto que produce el arrastre de sedimentos en la capacidad de captación del sistema.

Es así como este estudio continúa el trabajo realizado por García (2016) con sistemas de captación de fondo con rejas de barras tipo T, al investigar las características de sistemas con rejas de barras circulares.

Siguiendo la metodología desarrollada por García (2016) en su tesis doctoral, se realizaron mediciones en modelo físico para caracterizar el perfil de flujo, el coeficiente de descarga, y la capacidad de derivación de la reja cuando existe transporte de sedimentos.

Con estos estudios en modelo físico y la información disponible en la literatura técnica, se propone un software de dimensionamiento de rejas para sistemas de captación de fondo que pueda ser utilizada como una herramienta de diseño.

ABSTRACT

Bottom intake systems have been used to obtain water in countries with mountain rivers which are characterized by having steep longitudinal slopes and great variation of flows with high sediment content (Krochin, 1978), proving to be a technical and economic alternative due to their low cost of maintenance and operation. The efficiency of this type of intakes has also been studied in semi-arid regions, to derivate runoff flows in rainy seasons (Castillo & Lima, 2010; Castillo et al., 2016, García, 2016).

Despite all the studies that have been carried out to characterize the behavior of the flow in these systems, some questions remain such as the influence of the bottom rack geometry in the definition of the discharge coefficient of the rack or the effect produced by the sediment transport in the derivation capacity of the system.

This study continues the work developed by García (2016) with T-shape bars rack and different void ratios analyzing the characteristics of the bottom intake systems with circular bars rack.

Following the methodology proposed by García (2016), several laboratory campaigns were developed to characterize the flow profile, the discharge coefficient, and the derivation capacity of the rack when sediment transport is present.

In addition to these laboratory measurements, the information available in the technical literature is compiled and a rack sizing software is proposed for the bottom intake systems that can be used as a design tool.

PRESENTACIÓN

En la literatura técnica se dispone de recomendaciones para realizar el diseño de sistemas de captación de fondo. Algunas se han generalizado en el diseño, por ejemplo, la inclinación necesaria de la reja de fondo para minimizar o evitar el efecto de oclusión. Otras recomendaciones, sin embargo, varían dependiendo del tipo de investigación que se ha realizado en laboratorio o de algunas experiencias en prototipos.

En el presente trabajo se recopila la información disponible de investigaciones realizadas por varios autores, las experiencias desarrolladas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT, —incluyendo el trabajo realizado a efectos de esta tesis—, los criterios de diseño empleados en proyectos que se encuentran actualmente en construcción o en fase de estudios en Ecuador, y recomendaciones de manuales de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas; y se los emplea para desarrollar una propuesta de software de dimensionamiento de reja que pretende resumir el estado del conocimiento actual en esta materia.

De esta manera, este trabajo está dividido en cinco partes:

CAPÍTULO 1: constituido por la introducción al problema de diseño de sistemas de captación de fondo y la presentación del estado del arte. Se incluyen también los objetivos que se busca alcanzar.

CAPÍTULO 2: se detalla el modelo hidráulico construido en el laboratorio de la UPCT.

CAPÍTULO 3: se explica el trabajo experimental desarrollado en agua clara y se describen los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4: se proponen algunas expresiones para caracterizar el comportamiento del flujo sobre rejas de fondo con barras circulares, utilizando análisis empírico, dimensional e inspeccional.

CAPÍTULO 5: se explica el trabajo experimental desarrollado con transporte de sedimentos y se describen los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 6: se exponen los criterios y recomendaciones que se emplearán en el desarrollo del programa de diseño.

CAPÍTULO 7: presenta el desarrollo del software de dimensionamiento de rejas para captaciones de fondo en el entorno de programación MATLAB® R2018b.

CAPÍTULO 8: resume las aportaciones, conclusiones y posibles desarrollos futuros.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES: MOTIVACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO

La necesidad de dotar de agua a poblaciones asentadas en zonas con características geográficas, topográficas e hidrológicas especiales, han llevado a varios investigadores a centrar su atención en el estudio de los sistemas de captación con rejas de fondo desde que apareció la primera estructura de este tipo en Borjome (Cáucaso) en 1898 (Mostkow, 1957).

Este tipo de captaciones tradicionalmente se han utilizado en regiones montañosas debido a su capacidad de derivación con moderado arrastre de sedimentos lo que facilita los procedimientos de operación y mantenimiento cuando se encuentran ubicados en lugares de difícil acceso (Krochin, 1978).

En Regiones Andinas, caracterizadas por tener una topografía irregular, la implementación de captaciones con reja de fondo constituye una solución técnica apropiada para la provisión de agua para riego y para generar electricidad. En la Fotografía 1.1 se puede observar un río de montaña cerca de comunidades rurales en el páramo de Sincholagua (4000 msnm aproximadamente) en Ecuador que necesitan una captación de agua para riego (para mejorar y optimizar la producción de sus campos) y abastecimiento, ayudando así a fomentar el turismo.

(a)

(b)

Fotografía 1.1. Río de montaña en el Páramo del Sincholagua – Ecuador, (a) Tamaño de los sólidos transportados por el río; (b) Ubicación en el mapa de Ecuador.

De forma más concreta, en Ecuador, durante la última década se ha estado impulsando el desarrollo energético del país, desplazando sistemas de generación de energía obsoletos

—que utilizaban como materia prima combustibles fósiles que contaminan el medio ambiente— y desarrollando proyectos de generación con energía renovable, aprovechando la riqueza en recursos hídricos del país.

Es así como actualmente, en la zona centro sur de Ecuador, como parte del Proyecto Hidroeléctrico Mazar – Dudas, se están construyendo dos captaciones con rejas de fondo para la explotación de los proyectos San Antonio y Dudas. Cada captación cuenta una reja embebida en un azud y fueron diseñadas para derivar caudales de $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ del Río Mazar (Captación San Antonio) y $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ del Río Pindilig (Captación Dudas) («Proyecto Mazar-Dudas», 2018). En la Fotografía 1.2 se pueden observar las captaciones de los aprovechamientos y su ubicación en el mapa de Ecuador.

Fotografía 1.2. Sistemas de captación de reja de fondo construidos como parte del Proyecto Hidroeléctrico Mazar – Dudas: (a) Aprovechamiento Dudas; (b) Aprovechamiento San Antonio (Imagen cortesía de CELEC EP Hidroazogues), y (c) Ubicación en el mapa de Ecuador.

Otro proyecto que se encuentra en ejecución actualmente en la zona nororiental de Ecuador es el Proyecto Chalpi. El proyecto captará un caudal de $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ del río Chalpi Grande y de tres de sus afluentes —a través de cuatro sistemas de captación de fondo—, y conducirlo, por gravedad, hasta el embalse existente en Papallacta, que provee de agua potable a la ciudad de Quito. Incluye, además, la construcción de un aprovechamiento hidroeléctrico con una potencia instalada de 7.6 MW (ASTEC Cía. Ltda., 2012). A febrero

de 2019, el proyecto presentaba el 45% de avance de la primera fase (“Megaproyecto del Chalpi Grande – Papallacta,” 2019).

En la Fotografía 1.3 se muestra una imagen aérea de la zona de captación y conducción; así como la ubicación del proyecto en el mapa de Ecuador, mientras que en la Tabla 1.1 se resumen las principales características de las cuatro captaciones de fondo que conforman el proyecto.

(a)

(b)

Fotografía 1.3. Proyecto Chalpi (a) zona de captación y desarenador («Megaproyecto Chalpi Grande – Papallacta», 2019); (b) Ubicación en el mapa de Ecuador.

Tabla 1.1. Características de los sistemas de captación con reja de fondo del Proyecto Chalpi (ASTEC Cía. Ltda., 2012).

Captación	Chalpi A	Encantado	Chalpi B	Chalpi C
Caudal de diseño	2.20 m ³ /s	1.14 m ³ /s	0.47 m ³ /s	0.12 m ³ /s
Caudal (TR = 50 años)	140.20 m ³ /s	78.60 m ³ /s	40.60 m ³ /s	11.30 m ³ /s
Ancho del tramo del río	35 m	16 m	12 m	5 m
Tipo de barra	T	T	T	T
Espacio entre barras	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.0254 m
Distancia interejes	0.08 m	0.08 m	0.08	
Coefficiente de descarga	0.62	0.62	0.62	0.69
Longitud de reja	1.20 m	0.70 m	0.50 m	0.60 m
Ancho de reja	6.0 m	5.0 m	3.5 m	1.0 m

En Ecuador, además, existen varios proyectos de generación hidroeléctrica con sistemas de captación de fondo que se encuentran en diferentes fases de estudios. En la Tabla 1.2 se presentan algunos ejemplos y sus características de diseño (Andrade y Heredia, 2013; Escuela Politécnica Nacional, 2008).

Tabla 1.2. Ejemplos de Proyectos Hidroeléctricos en fase de estudios en Ecuador.

Proyecto	Jondachi Sardinas	Nanegal	Tulipe	Chuquiraguas	Chanchán
Fase de Estudio	Factibilidad	Prefactibilidad	Prefactibilidad	Prefactibilidad	Prefactibilidad
Ubicación	Napo	Pichincha	Pichincha	Cotopaxi	Chimborazo
Tipo de barra	Prismática	T	T	T	T
Espacio entre barras	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m
Distancia entre interejos	0.08 m	0.08 m	0.08 m	0.08 m	0.08 m
Pendiente longitudinal	21%	20%	20%	20%	20%
Longitud de reja	2.5 m	3.0 m	3.0 m	1.2 m	2.3 m
Ancho de reja	9.0 m	10.0 m	8.0 m	6.0 m	5.0 m
Caudal de diseño	8.80 m ³ /s	7.00 m ³ /s	11.50 m ³ /s	1.40 m ³ /s	4.83 m ³ /s
Caudal de máxima crecida	243.75 m ³ /s	390.80 m ³ /s	260.00 m ³ /s	90.00 m ³ /s	121.10 m ³ /s
Ancho en el tramo del río	40 m	48 m	17 m	11 m	10 m

Una de las ventajas que señala la literatura técnica está relacionada con las escasas labores de operación y mantenimiento que deben realizarse en este tipo de captaciones (Krochin, 1978); sin embargo, aún existe incertidumbre en el efecto de la oclusión de las rejas sobre parámetros como la longitud de reja necesaria para captar el caudal de diseño o el coeficiente de descarga (García et al., 2018b). En la Fotografía 1.4 se pueden observar las labores de mantenimiento que debieron realizarse en la captación San Antonio cuando las rejas fueron ocluidas por material de arrastre del río Mazar.

(a)

(b)

Fotografía 1.4. Proyecto Hidroeléctrico Mazar - Dudas (a) Labores de mantenimiento en la captación del aprovechamiento San Antonio (Imagen cortesía de CELEC EP Hidroazogues), y (b) Detalle de la oclusión de la reja con rocas y ramas.

Citando otro ejemplo, en Bolivia están contruidos al menos siete sistemas de riego con captaciones de rejas de fondo. Las características de seis de estos sistemas de captación se recogen en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Características de los sistemas de captación construidos en Bolivia (Programa Nacional de Riego, 2002).

Proyecto	Toralapa Alta	Kora Tiquipaya	Apote	Millu Mayu	Laimiña	Titiri
Tipo de barra	Tipo riel de ferrocarril	Prismática	Tipo riel de ferrocarril	Tipo riel de ferrocarril	Prismática	Tipo riel decauville
Espacio entre barras	0.05 m	0.08 m	0.08 m	0.05 m	0.12 m	0.10 m
Pendiente longitudinal	40% (21.8°)	40% (21.8°)	40% (21.8°)	50% (26.6°)	-	40% (21.8°)
Longitud de reja	1.50 m	1.50 m	1.20 m	1.20 m	1.00 m	0.60 m
Ancho de la reja	5.5 m	13.0 m	15.0 m	8.0 m	4.0 m	8.0 m
Caudal de diseño		0.80 m ³ /s		0.48 m ³ /s	0.10 m ³ /s	0.41 m ³ /s
Caudal de máxima crecida	30 m ³ /s (TR = 25)	55 m ³ /s (TR = 10)	-	80 m ³ /s (TR = 25)	50 m ³ /s	30 m ³ /s (TR = 10)
Ancho del tramo del río	12 m	35 m	25 m	11 m	15 m	55 m

Su diseño y proceso constructivo se basó en modelos estándar desarrollados para regiones montañosas y tras un estudio financiado por el Ministerio Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) se encontraron problemas de diseño en los siguientes aspectos (Programa Nacional de Riego, 2002):

- Ubicación inadecuada de la obra de toma,
- Destrucción de las estructuras de disipación,
- Oclusión de la reja (porcentaje de obstrucción del 15 al 20%),
- Elevados costos de mantenimiento de la obra de toma.

Como consecuencia, algunas obras de toma han presentado fallos en su operación, mientras que otras han sufrido su destrucción total o parcial, como se puede observar en la Fotografía 1.5.

(a)

(b)

Fotografía 1.5. Estado de las captaciones de fondo en Bolivia (a) taponamiento de la reja en la toma Apote, y (b) reja extraída de la estructura en Laimiña (Programa Nacional de Riego, 2002).

La necesidad de la población de acceder a servicios básicos de calidad y la correcta inversión de fondos públicos en obras que al menos cumplan con su tiempo de vida útil, se constituyen en dos factores importantes al momento de ejecutar estudios de investigación en obras de desarrollo, como las captaciones de fuentes de agua.

En el presente trabajo, se centra la atención en: caracterizar el comportamiento hidráulico de las rejas con barras circulares y dos índices de huecos ($m = 0.28$ y 0.60); analizar el comportamiento del flujo de este tipo de rejas ante la presencia de arrastre de sedimentos —y comparar los resultados con aquellos obtenidos previamente por García (2016) con las rejas de barras tipo T—; así como en proponer una herramienta de cálculo que sirva de guía a los diseñadores.

1.2 ESTADO DEL ARTE

Los ríos de montaña se caracterizan por tener pendientes longitudinales fuertes, lluvias intensas de corta duración, grandes variaciones de caudal y alto contenido de sedimento con escasos finos —agua limpia en época de estiaje— (Bouvard, 1953; Krochin, 1978). Las zonas semiáridas, en cambio, se caracterizan por tener escasas precipitaciones y gran variabilidad espacio – temporal, baja humedad de los suelos, escasez de cubierta vegetal, morfología abrupta y escorrentías con gran cantidad de transporte de sedimentos (García, 2016).

En las cuencas de ríos de montaña se han utilizado captaciones tirolesas o caucasianas por su capacidad de captación, derivando la mínima cantidad de sedimentos, lo que facilita su operación y mantenimiento cuando se ubican en lugares de difícil acceso (Krochin, 1978).

En las cuencas semiáridas se plantea la implementación de captaciones con reja de fondo en las partes altas para derivar caudales de escorrentía en tiempo de lluvias. Sin embargo, la alta capacidad de arrastre de sedimentos en este tipo de cuencas, precisa el estudio detallado de los parámetros de diseño a fin de optimizar el dimensionamiento de la estructura y garantizar la captación de caudales de avenida con elevada capacidad de transporte de sólidos (Castillo y Lima, 2010; Castillo y García, 2011; Castillo y Carrillo, 2011; García, 2016).

Las captaciones de fondo son estructuras que consisten en una reja formada por barras paralelas dispuestas longitudinal o transversalmente a la corriente —en este último caso también puede colocarse una placa perforada en lugar de las barras paralelas— y ubicada con cierta inclinación sobre una galería —hecha en el cuerpo de un azud o en el fondo de

un canal— que facilita la derivación del caudal como se puede observar en la Figura 1.1 y Figura 1.2.

Figura 1.1. Esquema de la implantación de la bocatoma (Castro, 2005).

Figura 1.2. Esquema del corte de la captación (Castro, 2005).

El diseño de estas estructuras debe cumplir con dos objetivos fundamentales (Castro, 1986; Krochin, 1978): captar la mayor cantidad de agua posible, y derivar el mínimo de

materiales sólidos de tal manera que no se produzca la obstrucción de la reja y se generen los menores impactos ambientales posibles.

Una vez definido el caudal de captación, para el correcto diseño de la reja, se necesita considerar los factores que afectan su eficiencia como la relación entre el área de huecos y el área total (índice de huecos), la forma de las barras, la pendiente de la reja (reduce la oclusión y facilita la autolimpieza), las condiciones de aproximación del flujo (número de Froude a la entrada) y la resistencia a la flexión de los perfiles (capacidad de resistir golpes o abrasión provocada por material grueso transportado por las avenidas).

El comportamiento de la reja de fondo ha sido analizado por varios investigadores como: Bouvard (1953); Brunella et al. (2003); Carrillo et al. (2018a, 2018b); Castillo et al. (2013a, 2014, 2016, 2017); Castillo (2004); Castillo y Carrillo (2012); Castillo y Lima, (2010); De Marchi (1947); Drobir (1981); Drobir et al. (1999); Frank (1956); García (2016); García et al. (2018a, 2018b); Garot (1939); Mostkow (1957); Nosedá (1956a, 1956b); Righetti y Lanzoni (2008), entre otros; y concuerdan en describir al flujo como tridimensional y espacialmente variado con caudal decreciente a lo largo de la reja, que presenta interacciones con las barras y un alto nivel de turbulencia. Sin embargo, como simplificación para realizar el ajuste de los parámetros de diseño, usualmente se adoptan las siguientes hipótesis:

- Distribución hidrostática de presiones a lo largo del flujo,
- Distribución uniforme de velocidad a lo largo de cada sección transversal,
- Flujo unidimensional con caudal decreciente,
- Aplicación de la Ecuación de Conservación de la Energía,
- Coeficientes de descarga ajustados experimentalmente.

A pesar de que existen pérdidas de energía, en algunos estudios se asume que ésta es despreciable (línea de energía horizontal) (Bouvard, 1953; Brunella et al., 2003; Frank, 1956; Righetti y Lanzoni, 2008); mientras que en otros casos, los análisis se basan en mantener la energía específica constante a lo largo de la reja, asumiendo que el calado que se presenta al inicio de la reja corresponde al calado crítico (Dagan, 1963; De Marchi, 1947; Krochin, 1978; Nosedá, 1956a).

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS REJAS DE FONDO

Se puede clasificar a las rejas en cuatro grandes grupos como se puede observar en la Figura 1.3 (K. Subramanya, 2009):

- Rejas con barras longitudinales

- Rejas con barras transversales
- Placas perforadas: con aberturas uniformemente espaciadas
- Ranuras de fondo: no contienen reja propiamente dicha

La disposición de las barras influye en el comportamiento hidráulico de las rejas:

- Barras longitudinales a la corriente: la derivación de caudal se expresa como función de la energía local del flujo (energía cinética);
- Barras transversales a la corriente o placas perforadas: la derivación de caudal es función de la profundidad local de flujo (energía potencial)

Figura 1.3. Tipos de rejas según Subramanya, 2009. (a) Rejas con barras longitudinales; (b) Rejas con barras transversales; (c) Placa perforada, y (d) Ranura de fondo.

1.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO

El caudal derivado por unidad de longitud y de ancho se representa como:

$$q_d = \frac{dq}{dx} \quad (1.1)$$

Para calcular el caudal que se deriva por la reja se utiliza la ecuación del orificio, considerando la distribución de velocidades en la proximidad (diferente de la distribución uniforme y que se toma en cuenta a través del coeficiente de velocidad, C_v) y la contracción del flujo a la salida (que se introduce a través del coeficiente de contracción, C_c). Estos parámetros dependen de la forma del orificio —forma de las barras y espaciamiento entre ellas— y se obtienen a través de medición experimental en laboratorio.

$$\frac{dq}{dx} = C_v C_c m \sqrt{2gH} = C_{qH} m \sqrt{2gH} \quad (1.2)$$

Donde m es el índice de huecos representado por la relación entre el espacio entre barras (b_1) y el ancho del intereje ($b_1 + b_w$, siendo b_w el ancho de la barra como se observa en la Figura 1.3); H es la energía total disponible con respecto al plano de la reja; x es la coordenada longitudinal a lo largo de la reja; C_{qH} es el coeficiente de descarga en función de la altura de energía, resultado del producto de los coeficientes de velocidad y de contracción del orificio.

Si a la ecuación (1.2), se la integra a lo largo de la longitud mojada de la reja se obtiene:

$$q = C_{qH} m L \sqrt{2gH} \quad (1.3)$$

Donde q es el caudal específico de captación y L es la longitud necesaria para derivar q .

El movimiento del agua sobre la reja se describe como flujo espacialmente variado (FEV) con caudales decrecientes con respecto a la coordenada x . Para el análisis del perfil de flujo a lo largo de la reja se realizan las siguientes suposiciones:

- Distribución de velocidad uniforme a lo largo de cada sección transversal (coeficiente de velocidad y presión constantes).
- Distribución hidrostática de presiones (no se toma en cuenta la curvatura de las líneas de corriente).
- Flujo unidireccional y unidimensional.

Con estas consideraciones, se puede aplicar el principio de conservación de energía a la lámina de agua:

$$H = z + h + \alpha \frac{U^2}{2g} \quad (1.4)$$

Siendo z la distancia vertical al plano de referencia; h el calado medido perpendicularmente al plano de la reja; α es el coeficiente de Coriolis (que se supone igual a 1.0); U la velocidad media en cada sección y g la aceleración de la gravedad.

1.2.2.1 Perfil de Flujo

Para analizar el perfil de flujo, existen dos criterios:

- La energía se mantiene constante (Bouvard, 1953; Brunella et al., 2003; Righetti y Lanzoni, 2008) como se observa en la Figura 1.4a.
- La línea de energía es paralela a la pendiente del fondo (Dagan, 1963; De Marchi, 1947; Krochin, 1978; Nosedá, 1956b) como se muestra en la Figura 1.4b.

Figura 1.4. Esquema de reja considerando (a) la línea de energía horizontal, y (b) paralela al fondo del canal (García, 2016).

Garot (1939), considerando una reja horizontal con Línea de Energía horizontal, plantea la siguiente expresión para definir el perfil de flujo:

$$\frac{dh}{dx} = -2mC_{qh} \frac{\sqrt{h(H-h)}}{2H-3h} \quad (1.5)$$

Donde: C_{qh} es el coeficiente de descarga calculado en función del calado

Si se realiza un análisis cualitativo de la ecuación, se pueden reconocer las tendencias del perfil de flujo:

- Si $2H > 3h$ (flujo supercrítico en cada sección) $\rightarrow dh/dx < 0 \rightarrow$ la profundidad disminuye en el sentido del movimiento con lo que el perfil de flujo es convexo.
- Si $2H < 3h$ (flujo subcrítico en cada sección) $\rightarrow dh/dx > 0 \rightarrow$ la profundidad aumenta en el sentido del movimiento con lo que el perfil de flujo es cóncavo.

En el análisis realizado por De Marchi (1947), considerando superficie libre de flujo estacionario gradualmente variado con caudales progresivamente crecientes o decrecientes, se propone la siguiente expresión:

$$\frac{dh}{dx} = k \frac{h(-dq/dx)q}{gh^3 - q^2} \quad (1.6)$$

$$\frac{dq}{dx} = C_{qh} m \sqrt{2gh} \quad (1.7)$$

Se utiliza un coeficiente experimental k con dos valores distintos: a) 1 si el caudal es decreciente y b) 2 si el caudal es creciente.

Según Subramanya y Shukla (1988), se pueden presentar tres tipos de flujo sobre la reja que dependen del flujo de aproximación, el comportamiento hidráulico de la reja y las condiciones a la salida, como se muestra en la Figura 1.5 y la Tabla 1.4.

Figura 1.5. Tipos de flujo sobre una reja según Subramanya y Shukla: (a) Tipo B2; (b) Tipo B1; (c) Tipo A3; (d) Tipo A2; (e) Tipo A1.

Tabla 1.4. Tipo de flujo sobre las rejillas según Subramanya y Shukla.

Tipo	Flujo de Aproximación	Comportamiento hidráulico sobre la rejilla	Régimen aguas abajo
A1	Subcrítico	Supercrítico	Se puede presentar resalto hidráulico
A2	Subcrítico	Parcialmente supercrítico	Subcrítico
A3	Subcrítico	Subcrítico	Subcrítico
B1	Supercrítico	Supercrítico	Se puede presentar resalto hidráulico
B2	Supercrítico	Parcialmente supercrítico	Subcrítico

Brunella et al. (2003) realizaron mediciones del perfil de flujo sobre rejillas con barras circulares e índices de huecos $m = 0.352$ y 0.664 , ángulos de inclinación de rejilla entre 0° y 51° , caudales específicos entre 0.07 y $0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Proponen una expresión universal para caracterizar este perfil que se reproducen en la ecuación (1.10):

$$Z = \frac{N}{h_c} \quad (1.8)$$

$$X = \frac{x}{h_c} \quad (1.9)$$

$$Z = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\tanh(X - 1)}{2} \right] \quad (1.10)$$

Donde: N es el calado perpendicular al plano de la rejilla y x es la coordenada longitudinal sobre el plano de la rejilla.

En la Figura 1.6a se observan las mediciones de laboratorio realizadas por Brunella et al. (2003) y el ajuste propuesto con la ecuación (1.10) para el perfil de flujo. Según los autores, para el rango de caudales ensayado y ángulos de inclinación de la rejilla entre 19° y 44° , no se encuentra un efecto apreciable de la pendiente longitudinal de la rejilla.

Para generalizar la ecuación (1.10), Brunella et al. (2003) realizan un cambio en la variable X como se presenta en la ecuación (1.11). Para validar la propuesta emplean la información de Nosedá (1956b) para barras tipo T con índices de huecos de 0.16 , 0.22 y 0.28 y pendientes longitudinales entre 0 y 20% . El resultado de la comparación se muestra en la Figura 1.6b.

$$X_R = \frac{x}{h_c} m C_{q0} \quad (1.11)$$

Donde C_{q0} es el coeficiente de descarga estático de la rejilla que, para el caso de barras tipo T, consideraron igual a 0.61 por ser de uso generalizado en este tipo de barras.

Figura 1.6. Perfil de flujo calculado en comparación con mediciones de laboratorio realizadas por (a) Brunella et al. (2003), y (b) Nosedá (1956b).

García (2016), también propone una expresión para caracterizar el perfil de flujo en rejillas con barras tipo T, basándose en la propuesta de Brunella et al. (2006), aplicada a mediciones realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT con tres configuraciones de rejilla (índices de huecos de 0.16, 0.22 y 0.28); con pendientes de rejilla que variaban entre 0% y 33%; y rango de caudales específicos entre 0.053 m³/s/m y 0.20 m³/s/m.

$$\frac{h}{h_c}(1 + tg\theta) = 0.56 \left[1 - \tanh \left(\frac{x}{0.46h_c} mC_{q0} - 0.505 \right) 0.94 \right] \quad (1.12)$$

En esta ecuación, el término $(1+tg\theta)$ introduce la influencia de la pendiente en la caracterización del perfil de flujo; observando además que esta influencia ocurre en valores de $tg\theta$ menores a 34% (19°) y en índices de huecos de hasta 0.28, complementando la conclusión de Brunella et al. (2003) a este respecto.

1.2.3 DEFINICIÓN DE LA LONGITUD DE REJA Y DEL COEFICIENTE DE DESCARGA

1.2.3.1 Garot (1939)

Garot (1939) resuelve analíticamente la ecuación (1.5), considerando un punto sobre la rejilla y otro punto donde se puede asumir que la energía del sistema corresponde únicamente a la energía potencial, de modo que se puede realizar una integración numérica (ver Apéndice I).

El resultado se presenta en la ecuación (1.13).

$$L = \frac{H}{C_{qh}m} \left[\Phi \left(\frac{h_2}{H} \right) - \Phi \left(\frac{h_1}{H} \right) \right] \quad (1.13)$$

$$\Phi \left[\frac{h}{H} \right] = \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2H} \sqrt{h(H-h)} - \frac{1}{2} \arcsen \sqrt{\frac{h}{H}} - \arcsen \sqrt{1 - \frac{h}{H}} \quad (1.14)$$

Donde h_1 es el calado al inicio de la reja, h_2 es el calado al final de la reja, $\Phi(h/H)$ es una función que relaciona la distancia longitudinal con la carga total de energía, C_{qh} es el valor del coeficiente de descarga.

Para la estimación de C_{qh} , Garot propone utilizar la ecuación (1.15) de Kirschner de cálculo de pérdidas de carga en rejillas de desbaste en canales de plantas de tratamiento de agua.

$$\Delta h = \beta \left[\frac{b_w}{b_1} \right]^{4/3} \frac{v_1^2}{2g} \sen \theta \quad (1.15)$$

En esta expresión: v_1 es la velocidad aguas arriba y perpendicular al plano de la reja, θ es el ángulo de inclinación de la reja con respecto a la horizontal; β es un coeficiente de forma en función del tipo de barra que se recoge en la Figura 1.7 y en la Tabla 1.5.

Figura 1.7. Forma de las barras consideradas por Kirschner en su expresión.

Tabla 1.5. Coeficiente de forma, β , propuesto por Kirschner (Hernández, 2001).

Forma	a	b	c	d	e	f	g
β	2.42	1.83	1.67	1.03	0.92	0.76	1.79

Para aplicar la ecuación (1.15), Garot supone que:

$$\Delta h = h \quad (1.16)$$

$$v_2 = C_{qh} \sqrt{2gh} \quad (1.17)$$

$$v_1 = m v_2 \quad (1.18)$$

Donde Δh es la pérdida de energía, v_2 es la velocidad de flujo a través de las barras y m es el índice de huecos. Entonces propone la ecuación (1.19):

$$C_{qh} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{b_1}{b_1 + b_w}\right)^2 \beta \left(\frac{b_w}{b_1}\right)^{4/3}}} \quad (1.19)$$

Los resultados calculados por Garot se recogen en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Coeficiente de descarga según Garot, para los distintos tipos de barras calculados para valores de $b_1 = 15$ cm y $b_w = 10$ cm.

Forma	a	b	c	d	e	f	g
C_{qh}	1.29	1.48	1.55	1.97	2.09	2.29	1.49

Estos valores son superiores a lo esperado, con lo que se puede decir que la suposición de las pérdidas de energía no es adecuada.

Adicionalmente, Garot, realizó una campaña experimental con barras tipo **b** (prismáticas redondeadas), ancho de barra de 1.0 cm y valores de $m = 0.30$, 0.402 y 0.50; en un canal de 50 cm de ancho. Aunque no se especifica en el trabajo de Garot, los valores obtenidos experimentalmente corresponden al coeficiente de descarga estático que se reproducen en la Tabla 1.7 (García, 2016).

Tabla 1.7. Coeficiente de descarga estático obtenido por Garot para la barra de forma b.

m	0.3	0.402	0.5
C_{q0}	0.78	0.80	0.86

Estos coeficientes y las longitudes de reja medidas en laboratorio, llevaron a Garot a proponer el ajuste de $\frac{1}{2}$ en la ecuación (1.13):

$$L = \frac{1}{2} \frac{H}{C_{qh} m} \left[\Phi \left(\frac{h_2}{H} \right) - \Phi \left(\frac{h_1}{H} \right) \right] \quad (1.20)$$

En conclusión, el factor de $\frac{1}{2}$ propuesto por Garot para el cálculo de la longitud permite incluir las siguientes consideraciones:

- El valor del coeficiente de descarga no es constante a lo largo de la reja
- El coeficiente de descarga promedio a lo largo de la reja es mayor que el coeficiente estático.

1.2.3.2 Bouvard (1953)

La metodología propuesta por Bouvard (1953) consiste en:

- Dividir la longitud de la reja en varias secciones. En la Figura 1.8 se observan las secciones S_1 y S_2 que señalan el inicio y el final de la longitud de la reja.

Figura 1.8. Secciones inicial y final que marcan la longitud de la reja según Bouvard (1953), tomado de Orth et al. (1954).

- El calado y la velocidad al inicio (h_1 y V_1 de la Figura 1.8, respectivamente) son conocidos y permiten calcular el calado y la velocidad aguas abajo de la reja (h_2 y V_2), con lo que se puede trazar el perfil de flujo.
- El flujo que pasa por la sección $S_1 - S_2$ es igual a:

$$q = L \Delta S \alpha \frac{\sqrt{2gh_1} + \sqrt{2gh_2}}{2} \quad (1.21)$$

Donde L es la longitud de la reja y α es el coeficiente de Coriolis.

- Por otro lado, si se supone que la pérdida de energía (Δh) es despreciable, se puede utilizar directamente la ecuación de energía:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \Delta h = \frac{Q - q}{L} + \frac{(Q - q)^2}{2gL^2Vh_2^2} \quad (1.22)$$

- El sistema de ecuaciones (1.21) y (1.22) se resuelve iterativamente. El cálculo inicia suponiendo un valor para h_2 (igual a h_1) con el que se calcula el valor de q (caudal captado por la reja). El valor de q calculado permite obtener un nuevo valor de h_2 hasta que el cálculo converge.

1.2.3.3 Orth et al. (1954)

Orth et al. (1954) realizó mediciones de longitud en un modelo a escala 1/5 (semejanza de Froude) de la captación con reja de fondo del río Grand Pryx en los Alpes Franceses (región de Savoya). El modelo constaba de un canal de 0.50 m de ancho de canal e incluía una

reja de fondo de 0.80 m de longitud. Los caudales de ensayo varían en un rango de 10 l/s hasta 89 l/s con inclinaciones de reja desde la horizontal hasta el 20%.

Con el objetivo de evitar la oclusión que se presentaba en las rejas con barras de sección circular, se ensayaron diversos tipos de barras como se puede observar en la Figura 1.9.

Figura 1.9. Tipos de perfil de reja ensayados por Orth et al. (1954), considerando $b_w = 25$ mm y $b_f = 11.3$ mm (barras tipo 1, 2 y 4), 7.3 mm (barra tipo 3); y 9.1 mm (barra tipo 5).

Como resultado de las mediciones, presentan curvas de la relación entre el caudal derivado y el caudal de aproximación, q_d/q_1 , con respecto al caudal de aproximación, Q_1 , para cada uno de los cinco perfiles considerando pendientes longitudinales del 0%, 10% y 20%. La Figura 1.10 indica el resultado para una pendiente del 20%.

Figura 1.10. Relación q_d/q_1 de los diferentes tipos de reja ensayados por Orth et al. (1954) para la pendiente del 20%.

Además, realizaron mediciones de la longitud mojada de reja necesaria para captar un determinado caudal empleando barras con perfil cuerpo de pez. Seleccionaron este tipo de barras, considerando que su perfil hidrodinámico favorece la derivación de caudal, reduce el riesgo de oclusión de la reja, así como una adecuada resistencia a la flexión.

La longitud medida en laboratorio se compara con la longitud calculada, empleando la metodología propuesta por Bouvard (1953), tal como se indica en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8. Longitud de reja mojada medida en laboratorio y calculada (Orth et al., 1954).

Caudal	Pendiente longitudinal	Longitud mojada de reja	
		Calculada	Laboratorio
30 l/s	10%	30 cm	30 cm $\pm$ 2
60 l/s	20%	50 cm	50 cm $\pm$ 4
80 l/s	30%	60 cm	65 cm $\pm$ 5

Estos resultados llevaron a los autores a concluir que, para el caso del perfil ensayado, los resultados experimentales de la longitud de reja presentan una buena relación con los valores calculados.

1.2.3.4 Frank (1956)

Frank (1956), asume que el perfil de flujo es un arco elíptico (Figura 1.11), cuyos ejes representan la longitud de flujo, L , y el calado crítico, h_c .

Figura 1.11. Perfil de flujo con forma de arco elíptico propuesta por Frank (1956).

Las coordenadas del arco de elipse (perfil de flujo) se determinan con las siguientes relaciones adimensionales:

$$x = \frac{\bar{s}}{L} \quad y = \frac{h}{h_0} \quad (1.23)$$

El centro de la elipse se encuentra en el punto $(0, h_0)$; siendo h_0 el calado perpendicular a los ejes $\bar{s}$ y h . Con esta consideración, la ecuación de la elipse puede expresarse como:

$$\frac{\bar{s}^2}{L^2} + \frac{(h - h_0)^2}{h_0^2} = 1 \quad (1.24)$$

Si se considera que la Línea de Energía es horizontal y se utiliza la ecuación del orificio (ver Apéndice I), se puede calcular la longitud de la reja utilizando:

$$L = 2.561 \frac{q_1}{\lambda \sqrt{h_0}} \quad (1.25)$$

Siendo:

$$\lambda = \sqrt{2g} m C_{q0} \cos^{3/2} \theta \quad (1.26)$$

$$h_0 = k_f h_c \quad (1.27)$$

$$2 \cos \theta k_f^3 - 3 k_f^2 + 1 = 0 \quad (1.28)$$

Donde: C_{q0} es el coeficiente de descarga estático de la reja que depende de la forma de las barras y que se asume constante; L es la longitud total de la reja; h_0 es el calado al inicio de la reja; y k_f es un factor de corrección que aproxima el calado crítico al calado inicial en la reja.

La metodología propuesta por Frank (1956) ha sido empleada en publicaciones sobre el diseño de sistemas de captación de fondo para pequeñas centrales hidroeléctricas o riego, como los trabajos de Andaroodi y Schleiss (2006); Drobir (1981); Fernández-Jáuregui et al. (1991); Lauterjung y Schmidt (1989); Programa Nacional de Riego (2002).

1.2.3.5 Nosedá (1956a) y (1956b)

Nosedá (1956a), partiendo de la ecuación (1.4) y basándose en las propuestas realizadas por Garot (1939) y por De Marchi (1947), propone una solución analítica similar a la de Garot que se presenta en las ecuaciones (1.29) y (1.30).

$$H = h \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \rightarrow H = h + \frac{q^2}{2gh^2} \quad (1.4)$$

$$L = \frac{H}{C_{qh} m} \left[\Phi \left(\frac{h_2}{H} \right) - \Phi \left(\frac{h_1}{H} \right) \right] \quad (1.29)$$

$$\Phi \left[\frac{h}{H} \right] = \frac{1}{2} \arcsen \sqrt{\frac{h}{H}} - \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h}{H} \left(1 - \frac{h}{H} \right)} \quad (1.30)$$

Donde h_1 es el calado al inicio de la reja, h_2 es el calado al final de la reja, y C_{qh} es el coeficiente de descarga variable.

Para resolver la ecuación (1.29), se asume que el calado al inicio de la reja coincide con el crítico y que se puede presentar flujo subcrítico o supercrítico a lo largo de la reja, obteniendo así dos expresiones:

$$\text{Para flujo subcrítico:} \quad L = 0.3994 \frac{H_0}{C_{qh} m} \quad (1.31)$$

Para flujo supercrítico:
$$L = 1.1848 \frac{H_0}{C_{qh}m} \quad (1.32)$$

Por otro lado, Nosedá (1956b), realiza mediciones en laboratorio empleando rejillas de fondo con barras tipo T e índices de huecos, $m = 0.16, 0.22$ y 0.28 . El caudal máximo alcanzó los 100 l/s. La pendiente de la rejilla varió entre 0% y 20%.

Entre las aportaciones de su estudio se tiene:

- Mediciones en laboratorio de caudal derivado por unidad de longitud.
- Cálculo del coeficiente de descarga variable por unidad de longitud.
- Suposición de que la variación de la pendiente y sus efectos en el flujo pueden ser despreciados.

$$C_{qh}(h) = \frac{\Delta q_d}{m \Delta L \sqrt{2gh}} \quad (1.33)$$

Donde: Δq_d es el caudal específico experimental derivado en el segmento de longitud ΔL y h es el valor experimental de la profundidad media de agua en el tramo considerado.

Finalmente obtiene dos expresiones para calcular el coeficiente de descarga variable:

Para régimen lento:
$$C_{qh}(h) = 0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13} \quad (1.34)$$

Para régimen rápido:
$$C_{qh}(h) = 0.78 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13} \quad (1.35)$$

Donde l es la longitud del interrejo (suma del ancho de la barra y el espacio entre barras). La ecuación (1.34) es válida para relaciones h/l entre 0.20 y 3.50 e índices de huecos m entre 0.15 y 0.28; mientras que la ecuación (1.35) se usa exclusivamente para $m = 0.28$. Se observa que m incide en el cálculo del coeficiente de descarga y que C_{qh} disminuye con la inclinación de la rejilla.

1.2.3.6 Mostkow (1957)

Mostkow (1957), considera las siguientes suposiciones:

- El canal es rectangular y prismático;
- El factor de corrección de Coriolis $\alpha = 1.0$;
- La energía específica se considera constante a lo largo de la rejilla
- La carga de energía sobre la rejilla depende del tipo de rejilla: i) para rejillas con barras paralelas – la carga de energía es igual a la energía específica; ii) para placas perforadas, es igual a la profundidad de flujo.

Para barras longitudinales a la corriente, Mostkow realiza el siguiente desarrollo:

$$\text{Ecuación general de caudal:} \quad dq = C_{q0} m \sqrt{2gH_0} dx \quad (1.36)$$

$$\text{Ecuación de derivación total:} \quad Q_p = C_{q0} L b m \sqrt{2gH_0} \quad (1.37)$$

$$Q_p = Q_1 - Q_2 \quad (1.38)$$

Caudal a partir de la ecuación de energía:

$$Q_1 = b h_1 \sqrt{\frac{2g}{\alpha} (H_0 - h_1)} \quad Q_2 = b h_2 \sqrt{\frac{2g}{\alpha} (H_0 - h_2)} \quad (1.39)$$

Donde: Q_1 es el caudal de aproximación; Q_2 es el caudal que alcanza el final de la reja y C_{q0} es el coeficiente de descarga estático de la reja. Mostkow toma los valores propuestos por Khatchatrian (en su tesis de 1955) de $C_{q0} = 0.609$ si $tg\theta = 0\%$ y $C_{q0} = 0.519$ si $tg\theta = 20\%$ (estos valores corresponden a una reja ubicada en el fondo de un canal).

Sin embargo, si la reja capta todo el caudal de aproximación ($Q_2 = 0$), la longitud de la reja se obtiene con la ecuación (1.40):

$$L = \frac{Q_1}{C_{q0} b m \sqrt{2gH_0}} \quad (1.40)$$

1.2.3.7 Frank (1959)

Frank (1959) realiza una comparación entre sus expresiones de cálculo para obtener la longitud de la reja necesaria para derivar un caudal determinado y aquellas presentadas por Nosedá (1956a y 1956b), presentando los siguientes resultados (ver Apéndice I):

$$\frac{L_F}{L_N} = \frac{1.0194}{\sqrt{k_f \cos\theta}} \quad (1.41)$$

$$C_{qh}(h_0) = 1.22 C_{qh(Nosedá)} \quad (1.42)$$

Donde L_F es la longitud obtenida con la propuesta de Frank (1956); L_N es la longitud propuesta por Nosedá (1956a) para régimen de flujo supercrítico sobre la reja; h_0 es el calado al inicio de la reja y C_{qh} es el coeficiente de descarga obtenido por Nosedá.

1.2.3.8 Dagan (1963)

Dagan (1963) toma como base los siguientes conceptos:

- Hipótesis de movimiento bidimensional (ecuaciones de energía, continuidad y orificio para las componentes horizontal y vertical de la velocidad en el plano de la reja y en la superficie del agua).

- Las características geométricas de la reja como el espaciamiento, la pendiente y la forma de la reja y las barras son constantes.
- El coeficiente de descarga es constante a lo largo de la reja.
- Distribución hidrostática de presiones.
- Flujo potencial.

$$\frac{h_0\sqrt{1-h_0}}{\sqrt{h_1}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (1.43)$$

$$\psi = C_{q0} m \frac{x}{H_0} \cos\theta \quad (1.44)$$

$$L = \psi \frac{H_0}{C_{q0} m \cos\theta} \quad (1.45)$$

Donde q_1 y q_2 son los caudales de aproximación y finales que recorren la reja en el intervalo considerado; y ψ es un parámetro que depende del coeficiente de descarga estático, C_{q0} , del índice de huecos (m), de la pendiente de la reja (θ) y de la energía específica al inicio (H_0).

La función ψ está limitada al porcentaje de caudal captado $\left(\frac{q_1 - q_2}{q_1}\right) = 0.90$, para el que fue comprobado el ajuste con los valores de Nosedá para índices de huecos entre 0.16 y 0.28; y pendientes entre 0° y 20° . Adicionalmente, Dagan asume un coeficiente de descarga estático, $C_{q0} = 0.72$.

1.2.3.9 Nakagawa (1969)

Nakagawa (1969) propone una relación entre el coeficiente de descarga dinámico y el estático a lo largo de la reja para rejas con barras circulares.

$$C_{qH}(x) = C_{qH0}(1.103)^{-x} \quad (1.46)$$

Aunque Nakagawa encontró diferencias entre los valores medidos en laboratorio para C_{qH0} , señala que el valor medio de este parámetro es 0.437.

1.2.3.10 White et al. (1972)

White et al. (1972), construyeron en laboratorio un modelo de reja de fondo con barras de forma hidrodinámica (Figura 1.12) a escala 1/6 (semejanza de Froude) para valores referidos a prototipo de:

- Caudal máximo: 566 l/s
- Ancho del canal: 2.74 m;
- Longitud de rejas variable de 0.61 m hasta 1.52 m;

- Ancho de barras: 15.24 cm;
- Índice de huecos entre 0.166 hasta 0.333.

Figura 1.12. Tipo de barras utilizadas por White et al. (1972).

En su publicación, presenta gráficos como la Figura 1.13 que relacionan el caudal entrante con el rendimiento de caudal captado para rejas y proponen el valor constante del coeficiente $C_{qh} = 0.815$ para la reja $m = 0.333$.

Figura 1.13. Relación de caudal captado con respecto al caudal de aproximación para distintos índices de huecos y 1.21 m de longitud de reja (White et al., 1972).

1.2.3.11 Krochin (1978)

Krochin (1978) propone una expresión que considera las siguientes hipótesis: a) calado crítico al inicio de la reja; b) ángulo del vector velocidad en el plano de la reja con la vertical constante e igual $56^{\circ}46'$; y c) carga de energía constante (ver Apéndice I).

$$L = \frac{(0.313q_1)^{2/3}}{C_{qH}k} \quad (1.47)$$

Donde q_1 es el caudal de aproximación, C_{qH} es el coeficiente de descarga en función de la carga de energía sobre las barras que se menciona más adelante, el coeficiente k es un

factor de reducción del área total de la reja en área efectiva disponible y se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = (1 - f)m \quad (1.48)$$

Donde f es el porcentaje de la superficie obstruida por arenas y gravas que se incrustan en la reja. Krochin sugiere tomar valores entre 15% y 30%.

Con respecto a la longitud de la reja, Krochin aconseja que, en la práctica, su valor no sea mayor a 1.25 m, pensando en la estabilidad estructural de este elemento.

Los coeficientes propuestos por Krochin (1978) son válidos para barras rectangulares y se calculan utilizando la siguiente expresión:

$$C_{qH} = C_0 - 0.325tg\theta \quad (1.49)$$

Donde $tg\theta$ es la pendiente longitudinal adoptada para la reja y C_0 es un coeficiente que depende de la relación t/b_1 (relación espesor de la barra/espacio entre barras).

$$\text{Si } \frac{t}{b_1} \geq 4 \rightarrow C_0 = 0.60 \quad \text{Si } \frac{t}{b_1} < 4 \rightarrow C_0 = 0.50 \quad (1.50)$$

Krochin no recomienda la utilización de barras circulares para evitar la oclusión con el arrastre de sedimentos entre las barras.

1.2.3.12 Drobir (1981)

Drobir (1981) —traducido al español por Castro (1982)— presenta recomendaciones de cálculo para sistemas de captación con rejillas de fondo basadas en las ecuaciones de Frank (1956 y 1959); y de Kuntzmann y Bouvard (1954), que consideran las siguientes hipótesis:

- Al inicio de la reja se produce el calado crítico.
- La distribución de presiones es hidrostática —se puede aplicar el Teorema de Bernoulli a lo largo de las líneas de corriente—.
- Para representar el perfil de flujo sobre la reja se puede utilizar una elipse cuyos ejes son el calado al inicio, h_0 , y la longitud mínima de la reja para captar el caudal de diseño.
- Se recomienda un espaciamiento entre barras de 150 mm considerando el estudio granulométrico de Sommer (1980), que afirmaba que el 90% del material analizado en los cauces de centrales de la TIWAG tiene un tamaño menor a 60 mm.
- Para evitar problemas de oclusión de la reja se recomienda que la longitud total de la reja sea igual a 1.5 o 2.0 veces la longitud mínima calculada.

- Para que se produzca la autolimpieza y disminuir la obstrucción, la pendiente de la reja debe estar entre 20% y 30%.

Para el cálculo de la longitud de la reja, Drobir propone aplicar las ecuaciones de Frank (1956) y Frank (1959):

$$h_0 = h_c k_f \quad (1.27)$$

$$2\cos\theta k_f^3 - 3k_f^2 + 1 = 0 \quad (1.28)$$

$$L = \frac{0.846}{C_{qh} m (\cos^{1/2}\theta) \sqrt{k_f}} \sqrt[3]{q_1^2} \quad (1.51)$$

Donde h_c es el calado crítico; k_f es el factor que relaciona el calado crítico con el calado al inicio de la reja h_0 ; y C_{qh} es el coeficiente de descarga promedio obtenido por Nosedá.

Con respecto al coeficiente de descarga, Drobir (1981) señala que depende de parámetros como el espacio entre barras y la forma. Para el caso de barras con sección rectangular, se producen pérdidas importantes de caudal —especialmente en el caso de caudales pequeños— debido a que permiten el escurrimiento de agua sobre la cara plana inclinada.

La compañía hidroeléctrica del Tirol (TIWAG) recomienda barras en forma de cuerpo de pez como se puede observar en la Figura 1.14. Drobir señala que el coeficiente de descarga para este tipo de barra corresponde a 0.90, considerando un índice de huecos, $m = 0.60$.

Figura 1.14. Sección de las barras de la reja de fondo. $C_{qh} = 0.90$. (Drobir, 1981).

1.2.3.13 Lauterjung y Schmidt (1989)

Lauterjung y Schmidt (1989) utilizan las expresiones propuestas por Frank (1956) modificadas como sigue:

$$Q = \frac{2}{3} c C_{q0} B L \sqrt{2gh} \quad (1.52)$$

$$c = 0.60m(\cos^{3/2}\theta) \quad (1.53)$$

Donde c es el coeficiente de contracción de la reja; C_{q0} es el coeficiente de descarga estático que depende de la forma de las barras (Figura 1.15); h_0 y k_f representan el calado al inicio de la reja y el factor de corrección que aproxima el calado crítico al calado inicial en la reja según Frank (1956) —ecuaciones (1.27) y (1.28)—.

Figura 1.15. Coeficiente de descarga estático de acuerdo al tipo de barra que conforma la reja (Fernández-Jáuregui et al., 1991; Simmler, 1978; Sotelo, 2002).

1.2.3.14 Vargas (1998)

Vargas (1998) utilizando las ecuaciones de trayectoria de proyectiles para describir la trayectoria de una partícula viajando en la superficie del agua, y suponiendo que la velocidad se encuentra uniformemente distribuida en la sección transversal de la reja, propone la siguiente ecuación:

$$L_{mojada} = K_2 \sqrt{\frac{2 \cos \theta q_1^2}{m g h_0}} \quad (1.54)$$

Donde K_2 es una constante de ajuste igual a 1.10; h_0 es el calado al inicio de la reja e igual a $0.7h_c$; q_1 es el caudal de aproximación y θ es el ángulo de inclinación de la reja.

Adicionalmente, Jiménez y Vargas (2006) comprueban la influencia de la pendiente de la reja así como del Número de Froude a la entrada en la longitud mojada.

1.2.3.15 Drobir et al. (1999)

Drobir et al. (1999) realizaron mediciones con un modelo a escala 1:10 en laboratorio y también mediciones en prototipo en una captación tirolesa (Central Hidroeléctrica de Sellrain – Silz), utilizando rejas con barras circulares y $m = 0.60$.

Identificaron dos longitudes características del flujo sobre la reja como se puede observar en la Figura 1.16: a) L_1 que representa la longitud máxima que alcanza la lámina de agua entre dos barras (la componente gravitacional predomina sobre la inercial); y b) L_2 que es la máxima longitud mojada sobre la reja —y que se constituye en la longitud de diseño de la reja—. La diferencia que existe entre el caudal captado en L_1 y L_2 puede alcanzar hasta el 23%.

Figura 1.16. Representación de las longitudes L_1 y L_2 medidas en el modelo de rejilla de la UPCT de acuerdo a lo planteado por Drobir et al., (1999).

Para calcular estas longitudes, se proponen las siguientes expresiones:

$$L_1 = 0.9088q_1^{0.4993} \quad (1.55)$$

$$L_2 = 1.7205q_1^{0.4296} \quad (1.56)$$

Donde q_1 es el caudal por unidad de longitud en la aproximación a la rejilla.

En su trabajo, además, obtienen una gráfica adimensional de caudales captados ($q_x/q_{m\acute{a}x}$ en función de x/L_2 , Figura 1.17) a lo largo de la rejilla para una pendiente longitudinal del 20%.

Figura 1.17. Captación de agua a lo largo de la rejilla para una rejilla en prototipo de barras circulares de 0.15 m diámetro y pendiente del 20% (Drobir et al., 1999).

1.2.3.16 Righetti et al. (2000) y Righetti y Lanzoni (2008)

Righetti et al. (2000) realizaron mediciones en laboratorio en un canal rectangular de 0.25 m de ancho y 12.0 m de largo. Las rejillas de fondo tenían 0.45 m de largo. La rejilla de fondo

se construyó en metacrilato para determinar el campo de velocidades utilizando un PIV (Particle Image Velocimetry).

Entre las conclusiones del estudio de Righetti et al. (2000) sobre el coeficiente de descarga, indican lo siguiente:

- El coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja, $C_{qH}(x)$, coincide con el seno del ángulo que el vector velocidad forma con el plano de la reja, $\text{sen}\phi$, (Figura 1.18).

$$dq = \text{sen}[\phi(x)]mdx\sqrt{2g[H_0 + x\text{sen}(\theta)]} \quad (1.57)$$

- Los valores de $C_{qH}(x)$, varían en un rango de 0.50 a 0.70 para caudales de aproximación entre 25 y 35 l/s. El valor del coeficiente de descarga disminuye a lo largo de la longitud de la reja.
- Comprueban que la pérdida de energía a lo largo de la reja es menor al 2%, con lo que se justifica la hipótesis de considerar la energía específica constante.

Figura 1.18. Representación del ángulo que forma el vector velocidad con el plano de la reja (Righetti y Lanzoni, 2008).

Posteriormente Righetti y Lanzoni (2008), estudian barras prismáticas con bordes redondeadas en la coronación (Figura 1.19) e índice de huecos, $m = 0.20$. Las pruebas se realizaron variando la inclinación del canal en una reja horizontal y el caudal máximo con el que se ensayó correspondió a 37.30 l/s.

Figura 1.19. Vista transversal de las rejas utilizadas por Righetti y Lanzoni (2008)

El valor del coeficiente de descarga estático, C_{q0} —que se reporta como resultado de la investigación— varía entre 0.95 y 1.0; considerando este rango aceptable en vista de los

resultados obtenidos por Brunella et al. (2003) y que se mencionan en el siguiente apartado.

También proponen una expresión para calcular el coeficiente de descarga variable:

$$C_{qH}(x) = C_{q0} \left(\frac{a}{2} \frac{x}{H_0} F_{H0} + 1 \right) \{ \tanh[b_0(\sqrt{2} - F_{H0})] \}^{b_a} \quad (1.58)$$

$$F_{H0} = \frac{Fr_0}{\sqrt{1 + \frac{Fr_0^2}{2}}} \quad (1.59)$$

Donde C_{q0} es el coeficiente de descarga medido en condiciones estáticas, F_{H0} es el Número de Froude al inicio de la reja (este valor se modifica al utilizar la energía específica al inicio de la reja, H_0 , en lugar de la profundidad hidráulica, D_0); los parámetros a , b_0 y b_a son constantes determinadas en laboratorio cuyos valores son: -0.1056, 1.5 y 0.6093 respectivamente.

Para el cálculo de la longitud de reja necesaria, Righetti y Lanzoni proponen utilizar la ecuación (1.60):

$$\Delta Q = C_{q0} m B L \sqrt{2gH_0} \left(\frac{a}{2} \frac{L}{H_0} F_{H0} + 1 \right) \{ \tanh[b_0(\sqrt{2} - F_{H0})] \}^{b_a} \quad (1.60)$$

1.2.3.17 Brunella et al. (2003)

Brunella et al. (2003) realizan mediciones en un canal de 0.50 m de ancho con rejillas longitudinales a la corriente, de barras circulares de 12 mm de diámetro y 0.60 m de longitud ($m = 0.35$); y de 6 mm de diámetro y 0.45 m de longitud ($m = 0.664$); la pendiente de la reja toma valores de 0° , 7° , 19° , 28° , 35° , 39° , 44° , y 51° .

Considerando el Número de Froude ≈ 0 en la reja horizontal, se determina el coeficiente estático de descarga (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 1.20. Coeficiente de descarga estático, C_{q0} , en función del Número de Reynolds al inicio de la reja, Re_0 , la línea espaciada (- -) representa los valores promedios (Brunella et al., 2003).

- Para barras de 12 mm y $m = 0,35$: $C_{q0} = 1.10$
- Para barras de 6 mm y $m = 0,664$: $C_{q0} = 0.87$

Con estos resultados, se propone el uso de C_{q0} constante para toda la reja. Además, explican la presencia de coeficientes de descarga estáticos mayores que uno como resultado de la curvatura y subpresiones que se desarrollan a lo largo de las barras circulares.

Para el cálculo de la longitud de reja necesaria, Brunella et al. (2003) proponen:

$$\frac{LC_{q0}m}{\frac{2}{3}H_0} \approx 1.245 \quad (1.61)$$

$$L = \frac{0.83H_0}{C_{q0}m} \quad (1.62)$$

Entre las principales conclusiones se destaca:

- Calculando el Número de Reynolds crítico, se identificó que en números de Reynolds menores a 2.5×10^5 se presentan efectos de escala.
- Para caudales mayores a un caudal límite, los perfiles de flujo describen una función única $Z(x)$. Para caudales muy pequeños esta característica no se cumple debido a efectos de escala (influencia de la viscosidad).
- El perfil circular trabaja mejor en términos de: capacidad de descarga, resistencia a la vibración y funcionamiento ante la obstrucción. Esta última afirmación es contraria a las recomendaciones realizadas por Krochin (1978).

1.2.3.18 Ghosh y Ahmad (2006)

Ghosh y Ahmad (2006) realizaron pruebas con barras planas, longitudinales a la corriente con un ancho de barra de 40 mm y espaciamiento entre barras de 2, 5 y 10 mm; la pendiente de la reja toma valores de 0.0667, 0.10 y 0.20. La expresión que proponen para el cálculo del coeficiente de descarga se reproduce en la ecuación (1.63):

$$C_q = 0.1296 \frac{t}{b_1} - 0.4284 t g \theta + 0.1764 \quad (1.63)$$

Donde t representa el espesor de la barra que conforma la reja.

1.2.3.19 Subramanya, 2009

Como resultado de estudios experimentales realizados por Subramanya (1990, 1994) en rejas con barras circulares cuyos índices de huecos variaban entre 0.157 y 0.487,

recogidos en Subramanya (2009), se proponen las siguientes relaciones para obtener el coeficiente de descarga en diferentes tipos de flujo:

- Rejas inclinadas:

$$\text{Tipo de flujo A1:} \quad C_q = 0.53 + 0.4 \log \left(\frac{b_w}{b_1} \right) - 0.61 t g \theta \quad (1.64)$$

$$\text{Tipo de flujo B1:} \quad C_q = 0.39 + 0.27 \log \left(\frac{b_w}{b_1} \right) - 0.8 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2} - 0.5 t g \theta \quad (1.65)$$

- Rejas horizontales:

$$\text{Tipo de flujo A1:} \quad C_q = 0.601 + 0.2 \log \left(\frac{b_w}{b_1} \right) - 0.247 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2} \quad (1.66)$$

$$\text{Tipo de flujo A3:} \quad C_q = 0.752 + 0.28 \log \left(\frac{b_w}{b_1} \right) - 0.565 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2} \quad (1.67)$$

$$\text{Tipo de flujo B1:} \quad C_q = 1.115 + 0.36 \log \left(\frac{b_w}{b_1} \right) - 1.084 \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2} \quad (1.68)$$

Donde Fr_0 es el número de Froude al inicio de la reja.

1.2.3.20 Kumar et al. (2010)

Kumar et al. (2010) realizaron pruebas con barras planas, longitudinales a la corriente con anchos de barra de: 19.1, 25.4, 31.8, 38.1, 50.8 mm y espaciamiento entre barras de 2, 5 y 9 mm. La pendiente de la reja tomaba valores de 1/1250, 1/847 y 1/500. Utilizando la técnica de ajuste con mínimos cuadrados, obtuvieron la ecuación (1.69) con un valor de coeficiente de correlación, $R^2 = 0.83$.

$$C_q = 0.471 - 0.124 \ln \left(\frac{b_1}{t} \right) - 0.194 t g \theta - 0.01 \frac{b_w}{t} \quad (1.69)$$

Donde t representa el espesor de la barra que conforma la reja.

Los coeficientes de descarga medidos en laboratorio con respecto a los calculados presentaban un error de $\pm 10\%$ que a juicio de los autores del estudio se considera satisfactorio.

1.2.3.21 García (2016)

García (2016), realiza mediciones en laboratorio utilizando rejas de captación de fondo similares a las utilizadas por Nosedá (1956) con un canal de aproximación de 0.50 m de ancho. Se utilizó rejas con barras tipo T e índices de huecos de 0.16; 0.22; y 0.28. Las

mediciones se realizaron variando los caudales desde 53.8 l/s/m hasta 155.5 l/s/m para cinco pendientes diferentes (0, 10, 20, 30, 33%).

Se propone dos tipos de longitudes, partiendo de las consideraciones realizadas por Drobir et al. (1999).

- Longitud máxima mojada sobre la barra:

$$L \approx 1.3 \frac{h_c}{C_{q0}m} (1 + 0.3tg\theta) \quad (1.70)$$

Donde: L es la longitud máxima mojada sobre la barra, h_c es el calado crítico, $tg\theta$ es la pendiente de la reja, m es el índice de huecos y C_{q0} es el coeficiente de descarga estático cuyo análisis se presenta más adelante.

- Longitud máxima que alcanza la lámina de agua entre dos barras (L_1):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}\sqrt{(H_0 + xsen\theta)(H_0 + xsen\theta - hcos\theta)} + hsen\theta}{3hcos\theta - 2(H_0 + xsen\theta)} \quad (1.71)$$

Donde: h es el calado del perfil de flujo en cada punto, la energía específica al inicio de la reja $H_0 = H_{min}$; θ es el ángulo de inclinación de la reja; C_{qH} es el coeficiente de descarga de la reja variable que se calcula utilizando la ecuación (1.75).

Como producto de esta investigación se obtuvo un gráfico (Figura 1.21) que compara las expresiones propuestas por diferentes investigadores, complementando así el trabajo realizado por Castillo y Lima (2010).

En cuanto al coeficiente de descarga, se plantean dos tipos:

- Coeficiente de descarga estático, C_{q0} , ajustado utilizando valores medidos en laboratorio y obtenidos de la bibliografía, en las siguientes expresiones:

Barra de sección circular: $C_{q0} = 1.4287e^{-0.771m} \quad (1.72)$

Barra de sección prismática redondeada: $C_{q0} = 1.15e^{-0.771m} \quad (1.73)$

Barra de sección tipo T: $C_{q0} = 0.901e^{-0.771m} \quad (1.74)$

- Coeficiente de descarga variable, C_{qH} , utilizado para calcular la longitud máxima que alcanza la lámina de agua entre dos barras:

$$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75\left(\frac{x}{h_c}m\right)}}{(1 + 0.90tg\theta)} \quad (1.75)$$

Donde: h_c corresponde al valor del calado crítico. Esta expresión es válida para rejas con barras tipo T.

Figura 1.21. Longitudes de reja para barras circulares en función del caudal específico para $m = 0.60$ y pendiente del 20%. (García, 2016).

1.2.3.22 Bina y Saghi, 2017

Bina y Saghi (2017) realizaron pruebas utilizando grillas de fondo - “mesh panel bottom rack” (reja longitudinal ubicada sobre una reja transversal). Los estudios se realizaron con agua clara y con arrastre de sedimentos; los parámetros de estudio se encuentran resumidos en la Tabla 1.9.

Para obtener los coeficientes de descarga se tomaron en consideración el flujo de aproximación a la reja, la geometría de la reja y las características de los sedimentos. Suponen que la energía específica (H_o) es constante. Como recomendación, se menciona que una pendiente del 36% para este tipo de reja (grilla de fondo) presenta un comportamiento óptimo cuando existe arrastre de sedimentos.

Los coeficientes de descarga propuestos se obtuvieron a través de estimaciones multiparamétrica con ajustes del 92.6% para agua clara y del 79% para flujo con arrastre de sedimentos:

- Coeficiente de descarga para agua clara:

$$C_q = 1.017 - 0.049 \frac{L}{y_0} - 0.002(tg\theta) - 0.678m - 0.01 \frac{b_{1L}}{b_w} - 1.2 \times 10^{-6} Re \quad (1.76)$$

- Coeficiente de descarga para agua con sedimentos:

$$\begin{aligned} \log(C_q) = 1.406 - 0.607 \log\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.293 \log(tg\theta) - 0.686 \log(m) \\ - 0.284 \log(Re) \end{aligned} \quad (1.77)$$

Donde: L es la longitud de la reja; y_0 es el calado de aproximación a la reja; b_{1L} es el espacio entre las barras longitudinales de la grilla de fondo.

Tabla 1.9. Parámetros de estudio (Bina y Saghi, 2017).

Parámetros de estudio:		
Sin sedimentos	Pendiente de la reja (%)	22, 28, 56
	Índice de huecos, m	0.30, 0.35, 0.40
	Longitud de la reja (m)	0.15, 0.23, 0.30
	Caudal (l/s)	10, 20, 30
Con sedimentos	Pendiente de la reja (%)	22, 28, 56
	Índice de huecos, m	0.30, 0.35, 0.40
	Longitud de la reja (m)	0.15, 0.30
	16 - 20	$d_{75} = 5 \text{ mm}$
	Caudal (l/s) 20 - 23	$d_{75} = 8 \text{ mm}$; y mezcla de 5 mm y 8 mm

1.2.3.23 Castillo et al. (2018)

Castillo et al. (2018) presenta de manera gráfica las diferencias que existen entre las diferentes expresiones de cálculo de la longitud de reja mojada propuestas en la literatura técnica.

La Figura 1.22 muestra la longitud de reja mojada, L , adimensionalizada con el calado crítico, h_c , en función del caudal de aproximación, q_1 para una reja con índice de huecos, $m = 0.60$. Aquí se observa que para el caso de $m = 0.60$ con barras de sección circular, los valores de longitud de reja adimensionalizados (L/h_c) varían desde 1.80 hasta 2.40, quedando por encima la envolvente de Drobir (L_2) con el valor de 3.70, para el caso concreto de caudal específico $q_1 = 1.00 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Mientras que, para las barras tipo T, los valores de longitud de reja adimensionalizada varían desde 2.40 hasta 3.30 cuando no se considera la obstrucción debida al transporte de sedimentos. En la parte superior, se

presentan los valores de longitud de reja de 3.90 y 4.70 que corresponden a rejas con porcentajes de obstrucción del 15% y del 30% respectivamente.

Figura 1.22. Relación entre la longitud de reja mojada, el calado crítico en función del caudal de aproximación a la reja (Castillo et al., 2018) para rejas con índice de huecos, $m = 0.60$, considerando las propuestas de diferentes investigadores.

Adicionalmente se presenta un gráfico resumen Figura 1.23 donde se realiza un promedio de las longitudes mojadas adimensionalizadas afectadas por el índice de huecos. Estas curvas se obtuvieron agrupando los resultados obtenidos con las expresiones de la literatura técnica, considerando los siguientes aspectos:

- Tipo de barra: el valor promedio de $L_{prom} (T)$, se calculó utilizando las expresiones de Krochin 0%, García (2016), Frank (1956), Drobir (1999), Bouvard y Kuntzmann (1956) y Nosedá (1956) para rejas con barras tipo T. Las expresiones de García (2016), Brunella et al. (2003) y Jimenez y Vargas (2006) se usaron para rejas con barras circulares, $L_{prom} (O)$.
- Factor de oclusión de las rejas: formulaciones que consideran el efecto del transporte de sedimentos (Krochin 15% y Krochin 30%) fueron separadas de aquellas formulaciones para agua clara

Figura 1.23. Relación entre la longitud de reja mojada, el calado crítico y el índice de huecos, en función del caudal de aproximación a la reja (Castillo et al., 2018) considerando diferentes tipos de barras y coeficientes de oclusión.

1.2.3.24 Consideraciones sobre el Coeficiente de Descarga

- Existe gran variabilidad en cuanto a los valores de C_{qh} , C_{qH} , C_{q0} , $C_{qh}(h)$, $C_{qH}(x)$ propuestos.
- Es importante distinguir entre el uso de h (calado) y H (energía) en el cálculo del coeficiente de descarga.
- Cada valor de coeficiente de descarga corresponde a las condiciones particulares de los ensayos realizados por cada investigador.
- No existe una metodología general de cálculo y de valores de C_q que permitan tener en cuenta las variaciones de diferentes parámetros.
- La estimación del coeficiente de descarga debería considerar: el tipo de reja, espaciamiento entre barras, pendiente longitudinal adoptada, caudal, condiciones de aproximación.

1.2.4 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La simulación de fluidos utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) constituye una herramienta importante para complementar el trabajo que se realiza en laboratorio con modelos físicos o en ausencia de modelos físicos cuando ha sido adecuadamente calibrada con información proveniente de trabajos experimentales o de prototipos (Carrillo

et al., 2018). En el caso de sistemas de captación de fondo, existen algunos trabajos realizados por equipos investigadores, que se detallan a continuación:

1.2.4.1 Castillo y Carrillo (2012)

Castillo y Carrillo (2012), comparan los resultados experimentales obtenidos por Nosedá (1956b) —flujo con agua clara en rejillas de fondo con barras tipo T y tres diferentes índices de huecos: 0.16, 0.22 y 0.28— con los resultados obtenidos de simulaciones numéricas realizadas con los programas de dinámica de fluidos computacional: ANSYS CFX y Flow-3D. Las consideraciones realizadas para la modelación numérica en cada software se presentan en la Tabla 1.10.

Para simplificar el modelo, se supone que todas las barras de la captación de fondo trabajan de forma similar, considerando simetría de condiciones en el plano central del espacio entre barras; por lo que el dominio de flujo contiene una barra longitudinal en medio de dos condiciones de simetría.

Las comparaciones se realizaron en parámetros como perfil de flujo y capacidad de derivación. Para el caso del perfil de flujo se encontró que el programa ANSYS CFX presentaba un perfil de flujo más ajustado a las mediciones en laboratorio que Flow-3D.

Tabla 1.10. Consideraciones realizadas para la modelación numérica.

Parámetro	ANSYS CFX	Flow-3D
Modelo de turbulencia	k- ω (SST)	k- ϵ (RNG)
Mezcla agua - aire	Modelo homogéneo	Opción un fluido y modelo con introducción de aire
Tipo de malla	hexaédrica	hexaédrica
Tamaño de malla	4 mm cerca de la rejilla y de 8 mm en el resto del modelo 109 262 elementos	2 mm cerca de la rejilla y 4 mm en el resto del modelo 331 484 elementos

En el caso de la capacidad de derivación: la precisión de los programas depende del espaciamiento entre barras y del caudal de aproximación; de tal forma que para el caso de la rejilla con índice de huecos mayor, la capacidad de derivación es similar al comparar los resultados de los programas y las mediciones de laboratorio; para el caso del índice de huecos de 0.22, el mayor caudal ensayado presenta mayores capacidades de derivación por parte de los dos programas con relación a las mediciones de laboratorio. Para la rejilla con menor índice de huecos, Flow-3D presenta capacidades de captación mayores que las medidas en laboratorio para los caudales más altos. Un ejemplo de los resultados para perfil de flujo y capacidad de captación se presenta en la Figura 1.24.

Figura 1.24. Comparación entre los resultados obtenidos con la modelación numérica y las medidas de laboratorio (a) perfil de flujo en la reja $m = 0.22$; y (b) capacidad de derivación de la reja $m = 0.16$. (Castillo y Carrillo, 2012).

Adicionalmente, se utilizó el estudio de Righetti y Lanzoni (2008) para realizar un análisis cuantitativo de las líneas de corriente y comparar el coeficiente de descarga propuesto como $\sin(\phi)$ (Figura 1.18). En la Figura 1.25 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos con estas simulaciones numéricas.

Figura 1.25. Resultados para coeficiente de descarga (Castillo y Carrillo, 2012).

Los autores resaltan que, a pesar del hecho de utilizar diferentes tipos de barras para realizar la modelación numérica y diferentes caudales de ensayo, los valores obtenidos para el coeficiente de descarga se encuentran en el mismo rango que los observados en el laboratorio por Righetti y Lanzoni (el coeficiente de descarga disminuye a medida que se reduce la profundidad de flujo); si bien los resultados de Flow-3D muestran mayor variabilidad del coeficiente de descarga.

1.2.4.2 Castillo et al. (2013a)

Castillo et al. (2013a) comparan la modelación numérica utilizando el software Flow-3D y las mediciones realizadas por Nosedá (1956b) y en el laboratorio de hidráulica de la UPCT para condiciones de agua clara y con arrastre de sedimentos.

Las consideraciones realizadas para la modelación numérica son similares a las empleadas en Castillo y Carrillo (2012), a excepción del tamaño de malla. Se empleó tamaño de malla de 1 mm cerca de la reja y 2 mm en el resto del modelo, con un total de 54 633 elementos. En la Figura 1.26 se muestra un ejemplo de la comparación entre los resultados obtenidos con la modelación numérica y las mediciones de laboratorio realizadas por Nosedá y en la UPCT, para el perfil de flujo y la capacidad de derivación.

Figura 1.26. Comparación entre los resultados obtenidos con modelación numérica y en laboratorio para la reja $m = 0.22$ (a) perfil de flujo; y (b) capacidad de derivación. (Castillo et al., 2013a).

En la Figura 1.27 se observa la variación del coeficiente de descarga, $\sin(\phi)$ para las configuraciones de reja ensayadas. El coeficiente de descarga no presenta variaciones significativas entre las rejillas con los diferentes índices de huecos modelado para un mismo caudal.

Figura 1.27. Comparación de los resultados obtenidos para el coeficiente de descarga para rejillas con diferente índice de huecos (Castillo et al., 2013a).

Para la modelación con transporte de sedimentos utilizaron un componente de transporte para simular el movimiento de las partículas sólidas en el fluido e incorporaron un módulo para simular el arrastre de fondo. La densidad y la viscosidad del fluido se calculan a partir de la concentración de sedimentos. El material empleado fue arena ($d_{50} = 5$ mm) y limo ($d_{50} = 1 \times 10^{-2}$ mm) o una mezcla de los dos materiales en igual proporción.

Al inicio de la reja, se modelaron diferentes concentraciones voluméticas entre 1% y 10%. Sin embargo, para analizar adecuadamente el efecto del arrastre de sedimentos, la longitud original de la reja se disminuyó de 0.90 m a 0.50 m.

La Figura 1.28 presenta los resultados de la reja con $m = 0.16$. Para el caso de la mezcla con una concentración del 10% y el máximo caudal ensayado ($q_1 = 198$ l/s/m), el caudal derivado se reduce prácticamente a la mitad del caudal de entrada.

Figura 1.28. Capacidad de derivación de la reja de captación considerando diferentes concentraciones de sedimentos para $m = 0.16$ (Castillo et al., 2013a).

1.2.4.3 Castillo et al. (2013b)

Castillo et al. (2013b) presentan los resultados obtenidos al incluir en la modelación numérica (Flow-3D) rejas con barras circulares calibradas utilizando información experimental y recomendaciones de diseño realizadas por Drobir (1981); y Drobir et al. (1999). La modelación consideró agua clara y arrastre de sedimentos.

Además de las consideraciones realizadas en Castillo y Carrillo (2012) y Castillo et al. (2013a), se menciona que el tamaño de malla para reproducir el modelo de Drobir fue de 0.025 m. En la Figura 1.29 se muestran los perfiles de flujo obtenidos con la modelación numérica para el modelo de Drobir et al. (1999).

En general se encontraron buenas aproximaciones para las longitudes L_1 y L_2 propuestas por Drobir; sin embargo, para los caudales altos, la longitud L_1 tiende a ser mayor que los valores experimentales, mientras que L_2 presenta valores menores. Los autores consideran que una de las causas podría ser el uso del método FAVOR usado por Flow-3D (para obtener las partes sólidas en el volumen de fluido) que no reproducía adecuadamente la forma circular de las barras por necesitar un tamaño más fino de malla. De esta forma los valores de h menores a 0.01 m no podían representarse con precisión debido al tamaño de malla empleado.

Figura 1.29. Perfiles de flujo en espacio entre barras (L_1) y sobre barra (L_2) para una pendiente longitudinal de 20%, $m = 0.60$ y diferentes caudales de aproximación. (Castillo et al., 2013b).

Figura 1.30. Perfiles de flujo L_1 y L_2 con agua clara y 5% de concentración de sedimentos para $q = 1.36 \text{ m}^3/\text{s/m}$, pendiente longitudinal de 20% y $m = 0.23$ (Castillo et al., 2013b).

Para la modelación con sedimentos se utilizó el tipo de arena ($d_{95} = 60 \text{ mm}$) que menciona Drobir (1981) en su artículo, considerando concentraciones volumétricas entre 1% y 5% al inicio de la reja. Se consideraron además tres índices de huecos para la modelación: 0.60, 0.375 y 0.23.

En la Figura 1.30 se observa los perfiles de flujo obtenidos con agua clara y considerando concentración volumétrica del 50% de sedimentos. La presencia de material sólido produce un incremento en la profundidad de flujo y por lo tanto también se observa un incremento en las longitudes L_1 y L_2 .

1.2.4.4 Hosseini et al. (2015)

Hosseini et al. (2015) realizaron una simulación numérica basándose en el modelo físico estudiado por Righetti y Lanzoni (2008). Se empleó el software Flow-3D.

Para realizar la simulación dividieron al modelo en tres zonas: la zona aguas arriba, la zona intermedia —donde se encuentra la reja— y la zona aguas abajo. En la zona intermedia se

utilizaron tamaños de malla de 2 mm para obtener resultados más confiables. En los 0.15 m inmediatamente aguas arriba de la reja se emplearon tamaños de malla de 4 mm y en el resto de la zona (2.35 m) se emplearon tamaños de 8 mm. En la zona aguas abajo (0.20 m) se emplearon tamaños de 4 mm.

Flow-3D presenta cinco modelos de turbulencia que pueden aplicarse en las simulaciones: “Single equation”, “Standard k- ϵ ”, “RNG k- ϵ ”, “Prandlt mixing length” y “Large Eddy Simulation”. Los autores utilizaron los cinco modelos de turbulencia para compararlos con las mediciones experimentales, encontrando que el modelo que mejores resultados produce es el RNG k- ϵ .

También se estudió el efecto del tamaño de la malla en las simulaciones para la zona intermedia utilizando mallas de 4 mm, 2 mm y 1 mm. Para el primer tamaño los resultados se desviaban de las mediciones experimentales mientras que no se presentaron grandes diferencias para los otros dos tamaños. Sin embargo, el tiempo empleado en la simulación con malla de 1 mm duplicaba el tiempo de simulación de la malla de 2 mm por lo que se escogió este último tamaño para las siguientes simulaciones.

Para estudiar el efecto de la geometría de las barras de las rejillas de fondo, se realizaron modelaciones adicionales cambiando el tipo de perfil de barra con las formas que se reproducen en la Figura 1.31.

Figura 1.31. Secciones transversales de los perfiles ensayados (Hosseini et al., 2015).

En cuanto a capacidad de derivación de caudal, los autores, encontraron que las barras tipo C3, C4 y C6 presentan bajas eficiencias mientras que las barras tipo C7, C8 y C9 tienen altas capacidades de derivación de caudal.

Considerando el comportamiento de la reja, el método constructivo y la facilidad de fabricación de las barras, los autores señalan como “prioritarios” los tipos de reja con barras

circulares, prismática con borde superior semicircular y tipo diamante (C2, C3, C7). Adicionalmente, señalan que las barras circulares —debido a su forma redondeada— trabajan mejor en presencia de sedimentos mientras que las barras tipo diamante tendrían mayores problemas de oclusión, aunque a este respecto no se presenta evidencia de investigación con sedimentos.

1.2.4.5 Carrillo et al. (2018a)

Empleando la experiencia adquirida en modelaciones anteriores (Castillo et al., 2013a, 2013b; Castillo et al., 2014; Castillo y Carrillo, 2012; García, 2016), Carrillo et al. (2018a) presentan la simulación numérica de rejillas de fondo con barras tipo T utilizando el software ANSYS CFX (versión 16.2). En este caso en particular se realizaron simulaciones considerando tres tipos diferentes de modelos de turbulencia: $k-\varepsilon$ standard, $k-\varepsilon$ (RNG) y $k-\omega$ (SST).

Para considerar la interacción agua-aire, se empleó el modelo homogéneo de flujo multifase; en el que la suma de la fracción de volumen de todas las fases debe ser 1.0.

Por simplicidad, consideran que todas las barras que conforman la rejilla trabajan de forma similar. El dominio de flujo se constituye entonces con tres barras y dos espacios entre barras. Las condiciones de simetría se usan en el plano central de las barras exteriores, como se puede observar en la Figura 1.32.

Figura 1.32. Detalle del dominio de flujo (Carrillo, et al., 2018a).

Una vez definido el dominio de flujo, se hizo un análisis de sensibilidad para el tamaño de la malla empleando tres valores: 0.002, 0.004 y 0.008 m, y se determinó que el tamaño adecuado de malla era 0.004 m en función de los resultados obtenidos para profundidad de flujo y longitudes L_1 y L_2 —y comparadas con mediciones de laboratorio realizadas en la UPCT— y del tiempo requerido para las simulaciones (unas cinco veces menos que la malla de 0.002 m).

En cuanto a los diferentes modelos de turbulencia empleados, no se encontraron diferencias significativas; sin embargo, en función de estudios previos realizados por los autores, escogen el modelo SST.

Las simulaciones se realizaron considerando cinco caudales específicos y cinco diferentes pendientes longitudinales de reja. En la Figura 1.33, Figura 1.34 y Figura 1.35 se observan diferentes comparaciones realizadas para perfil de flujo, capacidad de derivación del sistema de captación y coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja respectivamente.

Figura 1.33. Perfil de flujo sobre la reja con 30% de pendiente longitudinal (Carrillo et al., 2018a).

Figura 1.34. Capacidad de derivación para una reja con pendiente longitudinal de 30% (Carrillo et al., 2018a).

En el caso del perfil de flujo, se analizó además la longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal (longitudes L_1 y L_2), y se encontraron diferencias de alrededor del 1% con respecto a las mediciones de laboratorio. Las diferencias entre resultados aumentan a medida que el caudal de aproximación disminuye.

En el caso de la capacidad de captación, en laboratorio se realizaron mediciones en los primeros 0.50 m de reja en vista que, a partir de esta distancia, la cantidad de flujo es muy

pequeña para poder medirla con la precisión necesaria. Adicionalmente, la presencia del fenómeno de tensión superficial debida a la forma de las barras —tipo T— produce valores de L_2 altos a pesar de que aproximadamente el 95% del caudal se capta en las proximidades de L_1 .

Figura 1.35. Comparación del coeficiente de descarga obtenido con ANSYS CFX y con mediciones en laboratorio para una pendiente longitudinal del 30% (Carrillo et al., 2018a; García, 2016).

En el caso del coeficiente de descarga, los resultados de la modelación se compararon con el coeficiente de descarga variable propuesto por García (2016) y que se recoge en la ecuación (1.75):

$$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75\left(\frac{x}{h_c}m\right)}}{(1 + 0.90tg\theta)} \quad (1.75)$$

Al igual que en anteriores modelaciones, el coeficiente de descarga a lo largo de la rejilla se consideró igual a $\sin(\phi)$ —Figura 1.18—, y se encontró una buena correlación con el estudio de García (2016) y con Righetti y Lanzoni (2008).

Una de las recomendaciones importantes de este estudio radica en que las variables que influyen en el diseño de la rejilla —forma de las barras y su espaciado— no facilitan la extrapolación directa de los resultados, por lo que se necesita realizar más modelaciones para comprender de mejor manera la hidráulica de los sistemas de captación de fondo.

1.2.5 RÉGIMEN DE FLUJO SUPERCRÍTICO

1.2.5.1 Wong (2009)

Wong (2009) realiza la modelación física y numérica utilizando el software Flow-3D del esquema del Túnel de Drenaje Oeste de Isla Hong Kong, propuesto para derivar hacia el mar el flujo de inundaciones que afecta a sectores urbanos y de negocios en la isla. El diseño de esta propuesta consta de un túnel de 10.50 km de largo y 6.5 m de diámetro,

alimentado por 34 descargadores a vórtice —cuya altura media está alrededor de 80 m— ubicados en la cuenca de drenaje. Los sistemas de captación con rejillas de fondo se localizan en cursos de agua con fuertes pendientes —40%— y flujo supercrítico que alcanza velocidades del orden de 10 m/s. Durante los eventos significativos de tormentas, el flujo arrastra material sólido. El esquema se diseñó para el caudal con período de retorno de 200 años ($18 \text{ m}^3/\text{s}$).

El modelo físico se construyó en plexiglás considerando una escala de Froude de 1:9.5 —con respecto al prototipo—. El modelo consiste en un canal de aproximación con reja de fondo, galería de captación (que permite el cambio de dirección de flujo a 90°), canal de conexión y el vórtice de descarga como se puede observar en la Figura 1.36. La parte final del canal forma parte de la pared de la galería de captación.

Figura 1.36. Modelo físico (a) esquema en planta del modelo físico; y (b) fotografía del modelo construido (Wong, 2009).

El canal de aproximación tiene una pendiente de 21.8° (1:2.5); mientras que la reja de fondo tiene una pendiente longitudinal de 11.3° (1:5). Para el diseño general se escogieron rejillas circulares, aunque también se probaron otras geometrías de reja (tipo diamante, tipo I, cuadrada y trapezoidal). La pared de la galería de captación que continúa desde el canal presenta curvatura.

Las barras circulares tenían 12.1 mm de diámetro y 22.6 mm de separación entre centros ($m = 0.465$); mientras que las barras tipo diamante eran de 8.4×8.4 mm (barras cuadradas) y 23 mm de separación entre centros ($m = 0.478$). Se realizaron 50 ensayos con un rango de caudal entre 14.6 y 70.5 l/s, en los que se midió el perfil de flujo (utilizando limnómetro) y la concentración de aire.

Para caracterizar el flujo, Wong define tres tipos de longitudes para la reja (Figura 1.37):

Figura 1.37. Longitudes que caracterizan el flujo en la reja (a) L_w , y (b) L_{w1} y L_{w2} (Wong, 2009).

- L_w es la longitud de intersección de la reja y el agua y se asemeja a la longitud L_1 definida por Drobir et al. (1999) como se puede observar en la Figura 1.38.
- L_{w1} es la distancia en la cual la parte superior de las barras ya no está mojada y se asemeja a la longitud L_2 definida por Drobir et al. (1999).
- L_{w2} es la distancia donde el flujo que circula adherido a la parte inferior de las barras de la reja deja de estar en contacto con ellas como se observa en la Figura 1.39.

El comportamiento del flujo se describe como: flujo creciente al inicio de la reja que asintóticamente se acerca al fondo del canal. El flujo cercano a L_w decrece y se ve fuertemente influenciado por el efecto de flujo tridimensional. Después de que el flujo cruza la reja, se forman chorros de alta velocidad por debajo de la reja. El impacto de los chorros con el flujo que circula por el canal principal (Figura 1.37a) genera fluctuación en el perfil, pero no produce una significativa introducción de aire.

Como resultado de los ensayos de laboratorio, el autor considera que el comportamiento óptimo se presenta con la reja circular debido a su menor longitud mojada y a la mínima introducción de aire.

La simulación numérica de flujo se realizó en el programa Flow-3D para condiciones sin y con reja de fondo; la primera condición permitió analizar y calibrar el comportamiento de la galería de captación. En la Figura 1.40, se puede observar la configuración del mallado.

De manera general, el modelo reproduce la mayoría de las características del flujo como el campo de velocidad, la distribución de presiones y la energía cinética turbulenta; sin embargo, presenta resultados de introducción de aire mayores que los obtenidos en laboratorio.

Figura 1.38. Esquemas de la longitud L_w cuando (a) el flujo ingresa directamente a la galería de captación, y (b) el flujo continúa por el canal hacia una galería de captación (Wong, 2009).

Figura 1.39. Ejemplo de secciones de flujo adherido a la parte inferior de las barras de la reja (Wong, 2009).

Figura 1.40. Configuración de la malla para realizar la modelación numérica: (a) vista en planta; y (b) sección transversal (Wong, 2009).

1.2.5.2 Zerihun (2015)

Zerihun (2015) desarrolló un modelo numérico para caracterizar el perfil de flujo sobre sistemas de captación de fondo donde se incluyen características verticales de velocidad, la distribución de presiones no hidrostática —efecto de la curvatura en las líneas de corriente que se supone despreciable— y el efecto de la pendiente longitudinal en rejas de fondo, que se reproduce en la ecuación (1.78).

$$\begin{aligned}
 & \frac{q^2}{3} \frac{d^3 h}{dx^3} + (Z'_b - 1) \frac{q^2}{2h} \frac{d^2 h}{dx^2} + \left(gh - \beta \frac{q^2}{h^2} \right) \frac{dh}{dx} \\
 & + \left[\frac{q}{h} \Omega + \frac{3q}{2} \left(Z''_b + \frac{7}{9} \frac{d^2 h}{dx^2} \right) - \frac{q}{h} \left(Z'_b + \frac{dh}{dx} \right) \right] \frac{dq}{dx} - \frac{q}{3} \frac{d^2 q}{dx^2} \\
 & + \frac{1}{3} \left(\frac{dq}{dx} \right)^2 + \frac{q^2}{h} \left[\frac{h Z'''_b}{2} + Z''_b (Z'_b - 1) \right] + gh(I_f + Z'_b) = 0 \\
 & \Omega = 2\beta - \beta_L h \frac{U_L}{q}
 \end{aligned} \tag{1.78}$$

$$\Omega = 2\beta - \beta_L h \frac{U_L}{q} \tag{1.79}$$

Donde: q es el caudal específico, h es la profundidad de flujo, Z'_b , Z''_b y Z'''_b son la primera, segunda y tercera derivada del perfil del fondo (siendo Z_b la elevación del fondo del canal), g es la aceleración de la gravedad, Ω depende de la magnitud del cambio en la fuerza específica del flujo principal y del caudal de salida, y puede estimarse calibrando el modelo matemático empleando mediciones experimentales del perfil de flujo, I_f es la pendiente de la línea de energía; β es el coeficiente de Boussinesq y U_L es el componente de velocidad en la dirección de flujo.

Para resolver la ecuación (1.78), se necesita ubicar el ingreso y la salida del caudal en zonas donde el flujo pueda suponerse uniforme, con presión hidrostática y caudal

constante. Esta condición, en la zona de aproximación de caudal, se simplifica utilizando la ecuación de flujo gradualmente variado:

$$I_w = \frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_f}{1 - \beta Fr^2} \quad (1.80)$$

Donde: I_w es la pendiente de la superficie libre del agua, I_0 es la pendiente del fondo del canal y Fr es el Número de Froude.

Para el flujo de salida, la profundidad de flujo se coloca como condición de borde y debe permanecer constante.

Para considerar el flujo con caudal decreciente, se utiliza la ecuación (1.81).

$$\frac{dQ}{dx} = -mC_q B \sqrt{2gh} \quad (1.81)$$

Donde m es el índice de huecos de la reja y C_q es el coeficiente de descarga para el cual se consideraron expresiones propuestas por otros investigadores.

Para resolver la ecuación (1.81) se utiliza el método iterativo de Newton-Raphson junto con una matriz Jacobiana. La tolerancia se consideró igual a 10^{-6} . Los resultados obtenidos con el modelo matemático propuesto se comprobaron con información del modelo de rejas de fondo de Venkataraman estudiado en su tesis doctoral que contenía condiciones de aproximación supercrítica. La simulación reprodujo correctamente el perfil de flujo para el rango de caudales bajos; mientras que, para caudales medios y altos, la predicción se alejaba ligeramente de los valores experimentales hacia el final de la reja. La máxima diferencia entre los valores calculados y los experimentales era de 3.6%.

También comprobó la validez de los resultados obtenidos con el modelo numérico en flujo con aproximación subcrítica empleando la información del estudio de Nosedá (1956b). La correlación presentaba un error menor al 3.5%.

1.2.5.3 Chan et al. (2018), Chan y Lee (2018)

Tomando como punto de partida el estudio en modelo físico y numérico realizado por Wong (2009), Chan et al. (2018) y Chan y Lee (2018) presentan una nueva modelación numérica del esquema del Túnel de Drenaje Oeste de Isla Hong Kong empleando el código comercial CFD de ANSYS FLUENT, considerando que la interacción agua-aire en el modelo de Wong utilizando Flow-3D no pudo reproducirse adecuadamente.

En condiciones de aproximación subcrítica el flujo se caracteriza por ser espacialmente variado con caudal decreciente en el sentido de circulación del caudal; en cambio, en este tipo de diseño, el flujo que circula sobre la reja se sumerge en el flujo que ya se encuentra

circulando en la pared curva de la galería de captación y las rejas generan flujos complejos como chorros delgados que se adhieren a la parte inferior de las barras.

Figura 1.41. Configuración de la malla empleada en la modelación numérica y detalle de las secciones transversales de reja.

En la Figura 1.41 se observa la configuración de la malla empleada para la modelación numérica y detalles de las secciones transversales de reja con barras circulares y tipo diamante que fueron señalados como óptimos de acuerdo con el estudio de Wong (2009).

Para realizar la modelación se consideraron los siguientes aspectos:

- La determinación de la viscosidad dinámica turbulenta promedio para la mezcla agua-aire se realiza utilizando el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ (RNG).
- Se utiliza los algoritmos PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) para realizar las correcciones de los coeficientes de velocidad y presión.
- La ecuación de fracción de volumen se discretiza espacialmente utilizando el esquema modificado HRIC (High Resolution Interface Capturing).
- La convergencia del modelo ocurre cuando el residuo normalizado es menor que 10^{-4} para todas las variables.
- Cerca del fondo del canal y en la región de la reja de fondo se requiere refinamiento de la malla. El tamaño mínimo de la cuadrícula es de 1 mm.

En la Figura 1.42 se puede observar la comparación del perfil de flujo observado en laboratorio y el resultado de la modelación numérica. (sheet jet - láminas de chorros)

Figura 1.42. Perfil de flujo (a) en laboratorio; y (b) con modelación numérica. (Chan y Lee, 2018).

Con respecto al comportamiento del flujo, los autores resaltan las siguientes características:

- El flujo de aproximación es supercrítico y se mantiene en este régimen de flujo al atravesar la reja.
- Sin la presencia de la reja el flujo es paralelo al fondo del canal. Con la reja, la profundidad de flujo aumenta de forma asintótica a la pendiente longitudinal de la reja hasta que la intercepta.
- La profundidad de flujo incrementa entre un 8% y 22% debido a la contracción del flujo al pasar entre las barras.
- La contracción y expansión que se produce en el flujo al atravesar la reja genera disipación de energía. La velocidad máxima se presenta cuando el flujo abandona la reja.
- Cuando el flujo atraviesa la reja se presentan dos tipos de corrientes: el flujo adherido a la reja y el flujo del canal principal. El flujo ingresa a la galería de captación a través de las rejillas y produce un flujo “principal” que corre a lo largo de la pared de la galería (continuación del canal principal).
- Experimentalmente y con la modelación numérica se determina que la menor longitud L_w se presenta en las rejillas con barras circulares.
- La presencia de ondas de choque en la superficie supercrítica de flujo genera una variación en la profundidad de flujo —en la dirección transversal— de aproximadamente 2% a 5% de la profundidad promedio.

Además, utilizando las predicciones realizadas con respecto a la concentración de aire en la masa de agua, se definen las tres longitudes de reja empleadas por Wong (2009) como:

- L_w es la distancia medida desde el inicio de la reja hasta el punto donde la mezcla agua-aire con una concentración del 50% alcanza la parte superior de la reja. Esta longitud representa la principal longitud de intersección.

- L_{w1} es la distancia medida desde el inicio de la reja hasta el punto donde la mezcla agua-aire con una concentración del 95% alcanza la parte superior de la reja; y representa una capa delgada de agua en contacto con la reja.
- L_{w2} es la distancia medida desde el inicio de la reja hasta el punto donde la mezcla agua-aire con una concentración del 95% alcanza el borde inferior de la reja. Esta longitud representa el tramo final donde se presentan las capas de chorros.

Los valores de longitud L_w obtenidos con la modelación, presentan un error del 22% para el caso de barras tipo diamante y del 25% para barras circulares, en comparación con las mediciones de laboratorio. Para el caso de L_{w1} y L_{w2} se encontraron problemas para representar adecuadamente la capa delgada de flujo.

1.2.6 ANÁLISIS DIMENSIONAL

1.2.6.1 Ghosh y Ahmad (2006)

Para realizar el análisis dimensional, Ghosh y Ahmad (2006), consideraron los siguientes parámetros como los de mayor influencia en la determinación del coeficiente de descarga:

$$C_q = f(U_0, h_0, B, L, t, b_w, b_1, g, \mu, \rho, tg\theta) \quad (1.82)$$

$$C_q = f_3\left(\frac{t}{b_1}, tg\theta\right) \quad (1.83)$$

Donde: U_0 es la velocidad al inicio de la reja; h_0 es el calado al inicio de la reja; B es el ancho de la reja; L es la longitud de la reja; t es el espesor de la barra que conforma la reja; b_1 es el espaciamiento entre barras; g es la aceleración de la gravedad; μ es la viscosidad dinámica del agua; ρ es la densidad del agua y $tg\theta$ es la pendiente de la reja.

1.2.6.2 Righetti y Lanzoni (2008)

Para Righetti y Lanzoni (2008), los parámetros de mayor influencia en la determinación del coeficiente de descarga son:

$$C_q = f\left(\rho, g, U_0, H_0, \Delta h, x, \frac{dq}{dx}, \theta, forma\right) \quad (1.84)$$

$$C_q = sen\alpha = \Phi\left(\frac{x}{H_0}, Fr_{H_0}, forma\right) \quad (1.85)$$

Donde: ρ es la densidad del agua; g es la aceleración de la gravedad; U_0 es la velocidad de aproximación del flujo al inicio de la reja; H_0 es la energía específica al inicio de la reja; Δh es la energía disipada por unidad de peso de fluido y por unidad de longitud; dq/dx es

el caudal derivado por unidad de longitud de reja; θ es el ángulo que forma la reja con la horizontal; y la forma indica la dependencia de las características geométricas de la reja (por ejemplo: índice de huecos, forma de las barras); F_{H0} es el número de Froude modificado que se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$F_{H0} = \frac{U_0}{\sqrt{2gH_0}} \quad (1.86)$$

1.2.6.3 Subramanya (2009)

Para Subramanya (2009), los parámetros de mayor influencia en la determinación del coeficiente de descarga son:

$$C_q = f\left(\frac{b_w}{b_1}, tg\theta, \frac{Fr_0^2}{2 + Fr_0^2}, \text{tipo de flujo}\right) \quad (1.87)$$

Donde Fr_0 es el número de Froude al inicio de la reja y el tipo de flujo corresponde a los propuestos por Subramanya y Shukla (1988).

1.2.6.4 Kumar et al. (2010)

Kumar et al. (2010) consideraron los siguientes parámetros como los de mayor influencia en la determinación del coeficiente de descarga:

$$C_q = f_1(B, L, I_0, H, W, t, b_w, b_1, tg\theta, L_2, U_0, h_0, h_s, H_0, \mu, \rho, g) \quad (1.88)$$

$$C_q = f_3\left(I_0, \frac{b_w}{t}, \frac{b_1}{t}, tg\theta, \frac{H_0}{t}\right) \quad (1.89)$$

Donde B es el ancho del canal de aproximación (ancho de la galería de captación perpendicular al sentido de flujo); L es la longitud de las rejillas de fondo; I_0 es la pendiente del canal de aproximación; H es la profundidad de la galería de captación (medida en la mitad del ancho desde el punto más bajo); W es ancho de la galería en el sentido del flujo; t es el espesor de las barras de la reja; L_2 es la longitud mojada sobre las barras; h_s es la profundidad de sumergencia de la galería.

1.2.6.5 García (2016)

Para García (2016) los parámetros de mayor influencia en la determinación del coeficiente de descarga son:

$$f\left(U_0, h_0, H_0, \frac{B}{L}, \frac{b_w}{b_1}, \mu, \sigma, \rho, \frac{1}{g}, tg\theta, C_{q0}, C_{qH}\right) = 0 \quad (1.90)$$

$$C_{qH} = f\left(U_0, h_0, H_0, \frac{b_w}{b_1}, \mu, \sigma, \rho, \frac{1}{g}, C_{q0}\right) \quad (1.91)$$

$$C_{qH} = f\left(\frac{H_0}{h_0}, \frac{b_w}{b_1}, \frac{1}{Re}, \frac{1}{We}, \frac{1}{Fr^2}, C_{q0}\right) \quad (1.92)$$

Donde U_0 es la velocidad al inicio de la reja, h_0 es el calado al inicio medido perpendicularmente a la inclinación de la reja, H_0 es la energía al inicio de la reja, B/L es la relación entre el ancho y la longitud de la reja, b_w/b_1 es la relación entre el ancho de la barra y la separación entre barras, μ es la viscosidad dinámica, σ es la tensión superficial, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, $tg\theta$ es la pendiente longitudinal de la reja, C_{q0} es el coeficiente de descarga estático de la reja y C_{qH} es el coeficiente de descarga en función de la altura de energía, Re es el Número de Reynolds; We es el Número de Weber y Fr es el Número de Froude.

La ecuación (1.92), se obtiene después de aplicar el Teorema de Buckingham a la ecuación (1.91). El proceso realizado se describirá en detalle en el Capítulo 4.

1.2.6.6 Bina y Saghi (2017)

Para realizar el análisis dimensional, Bina y Saghi (2017), consideraron los siguientes parámetros como los de mayor influencia en la determinación del coeficiente de descarga:

$$C_q = f_1(\rho, \mu, g, m, tg\theta, L, b_{1T}, b_{1L}, b_w, U_0, y_0) \quad (1.93)$$

Con agua clara:

$$C_q = f_2\left(Re, We, Fr_0, m, tg\theta, \frac{L}{y_0}, \frac{b_{1L}}{b_w}\right) \quad (1.94)$$

Con sedimentos:

$$C_q = f_2\left(Re, Re_*, We, Fr_0, m, tg\theta, \frac{L}{y_0}, \theta, \frac{b_{1L}}{d}, \sigma_g, \frac{d_{50}}{y_0}\right) \quad (1.95)$$

Donde: b_{1T} y b_{1L} representan el espaciamiento entre barras de la reja transversal y longitudinal a la corriente respectivamente; Re_* es el Número de Reynolds límite (para que inicie el movimiento de las partículas); θ es el parámetro adimensional de Shields del esfuerzo de corte crítico en el fondo del canal; σ_g es la desviación estándar de las partículas de sedimentos; d_{50} es el diámetro medio de las partículas en la curva granulométrica.

1.2.7 CONSIDERACIÓN DE LA PRESENCIA DE SEDIMENTOS EN EL DISEÑO DE REJAS DE CAPTACIÓN DE FONDO

Para realizar el diseño de una obra de captación de fondo, es necesario cumplir ciertos objetivos (Castro, 1986) como:

- Garantizar la captación de un caudal líquido fijo para toda la gama de caudales en el curso natural;

- Minimizar el ingreso hacia la toma del material sólido grueso y material flotante, permitiendo el tránsito de éstos hacia el tramo aguas abajo del río;
- Minimizar el ingreso de sedimentos (considerando el uso que se va a dar a la estructura);

En la literatura técnica existen varias recomendaciones para satisfacer estos requerimientos, las mismas que se resumen a continuación:

1.2.7.1 Orth et al. (1954)

Adicionalmente a la información presentada en el apartado 1.2.3.3, Orth et al. (1954) realizaron un estudio cualitativo del efecto del transporte de sedimentos en la reja, sobre la base de sus observaciones en estructuras existentes y en experiencias en modelo reducido, presentando las siguientes conclusiones:

- Cualquier perfil cuya parte superior está redondeada facilita el enganche de gravas entre las barras de la reja.
- Un sólido de tamaño cercano al espacio entre dos barras inevitablemente se atasca entre ella, independientemente del perfil que se utiliza.

1.2.7.2 Ract-Madoux et al. (1955)

Ract-Madoux et al. (1955), propone utilizar un espaciamiento entre barras, $b_1 = 0.10$ m para disminuir problemas asociados al riesgo de heladas y obstrucción por gravas en la región de Saboya, Francia. También sugiere utilizar barras cuerpo de pez o tipo rieles de ferrocarril invertidas con superficie redondeada para favorecer la captación de agua.

1.2.7.3 Krochin (1978)

Krochin (1978) sugiere colocar la reja sobre un azud cuya altura oscile entre 0.20 y 0.50 m para que las gravas pasen con facilidad por encima del azud y se pueda suprimir la compuerta de purga que agrega costo a un proyecto.

La sección transversal de las barras será seleccionada en función de su longitud y de condiciones estructurales para que puedan resistir el peso de piedras grandes sin deformarse. La forma sugerida es rectangular o trapezoidal —con la base mayor hacia arriba—. Sin embargo, debido a la posibilidad de deformación de las barras rectangulares, se recomienda utilizar en su lugar barras tipo T. Krochin no aconseja utilizar barras circulares debido a que se obstruyen más fácilmente con arena y grava y son más difíciles de limpiar.

La inclinación de la reja puede variar entre 0% y 20% para facilitar el paso de material sólido, aunque se menciona que puede llegar hasta los 40°. En cuanto a la separación de las barras, b_1 , sugiere una variación entre 0.02 y 0.06 m.

Krochin, en el cálculo de la longitud de la reja, considera un factor de obstrucción de la reja que varía entre 15% y 30%. También recomienda que, en la práctica, el valor de L no supere los 1.25 m.

1.2.7.4 Drobir (1981)

Drobir (1981), sugiere que la reja se disponga a una altura conveniente sobre el lecho natural del río para evitar que el material pétreo pueda sobrepasarla (Figura 1.43).

Figura 1.43. Esquemas de obras de captación propuestas en función de la cantidad de sedimentos según Drobir (1981).

En cuanto al espaciamiento de barras, b_1 , se recomienda un valor de 0.15 m, basado en las curvas de distribución granulométrica de los materiales realizadas por Sommer (1980) para diferentes proyectos de la TIWAG. Drobir menciona que espaciamientos menores — como por ejemplo 0.03 m — se taponan con mayor facilidad y por lo tanto producen mayor pérdida de agua de captación. Además, recomienda afectar por un factor de 1.5 a 2.0 veces a la longitud calculada para garantizar la captación del caudal de diseño incluso con la reja parcialmente taponada —sugerencia que vuelve a realizarse en Drobir et al. (1999)—.

En cuanto a la pendiente de la reja, señala que depende de la pendiente del río y que puede variar entre 20% y 30%. La forma de la barra también es importante. Se menciona que en los proyectos de la TIWAG se han utilizado formas de barra de cuerpo de pez para

la reja de captación y semicircular para los troncos de madera de protección de la captación como se puede observar en la Figura 1.43.

1.2.7.5 Castro (1986)

Castro (1986) realiza las siguientes consideraciones acerca de las captaciones con reja de fondo:

- El espaciamiento entre barras puede alcanzar los 10 cm o más cuando el caudal derivado va a ser conducido a un embalse; mientras que si el caudal va a conducirse directamente al canal de carga debería ser más pequeño (2 cm o menos).
- La relación entre el ancho de la barra y el espaciamiento entre barras debe ser de 2:1 ($m = 0.333$).
- La sección de la barra debe seleccionarse considerando que el efecto de oclusión sea el mínimo.
- La pendiente longitudinal de la reja puede variar entre el 20% y el 30%.

Castro (1986) también menciona que, de acuerdo con datos experimentales, se necesita aproximadamente 2.0 m² de reja para captar 1.0 m³/s de agua; aunque existen registros de áreas de reja en rangos de 5.0 a 7.0 m² para cada 1.0 m³/s en captaciones con buen funcionamiento.

1.2.7.6 Lauterjung y Schmidt (1989)

Lauterjung y Schmidt (1989), emplean las ecuaciones propuestas por Frank (1956) para calcular las dimensiones de la reja y recomiendan que la longitud escogida para la captación sea igual a 1.20 veces la longitud calculada para garantizar la derivación del caudal de diseño aun cuando exista oclusión de la reja debido a la presencia de material flotante y grava.

1.2.7.7 Bouvard (1992)

Bouvard (1992), realiza una serie de consideraciones para diseñar rejillas de fondo:

- Para proyectos que no incluyan turbinas o sifones, recomienda utilizar espaciamientos entre barras entre 0.10 y 0.12 m.
- Para proyectos que incluyan turbinas o sifones, el espaciamiento entre barras sugerido es de 0.02 a 0.03 m.
- La pendiente longitudinal de la reja suele variar entre 10% y 20%; sin embargo, debido a problemas de oclusión puede alcanzar un 30% o incluso el 60%.

- La forma de las barras es importante. Tres de las formas que Bouvard considera más factibles se presentan en la Figura 1.44.

Figura 1.44. Tipos de barras para captaciones de fondo.

- Cuando existe riesgo de oclusión de la reja se recomienda incrementar la longitud calculada en 1.5 a 2.0 veces el valor calculado.
- Si no ocurre oclusión durante una crecida, el diseño con el incremento de longitud en la reja puede exceder la capacidad de los siguientes elementos del proyecto como el desarenador, por lo que recomienda realizar revisiones de los cálculos considerando el excedente de caudal que podría ser captado.

1.2.7.8 Raudkivi (1993)

Raudkivi (1993) señala:

- La cantidad de sedimento que arrastra un río durante una creciente puede alcanzar concentraciones volumétricas entre el 25% al 30%.
- El mínimo valor de espaciamiento entre barras que debe considerarse es 0.005 m, de acuerdo con la experiencia.
- El área total de espacios entre barras suele encontrarse entre el 30% y el 50%.
- Se recomienda una pendiente longitudinal de la reja del 20%, aunque puede variar entre 5% y el 35%.
- La forma de las barras afecta la eficiencia de la reja y su estabilidad. Las formas que han tenido un buen desempeño son las secciones trapezoidales o rieles de ferrocarril.
- Si el flujo aguas arriba de la reja es supercrítico, el flujo puede saltar parte o toda la reja sin producirse la derivación esperada de caudal.

1.2.7.9 Vargas (1998)

Vargas (1998), en base a la experiencia en la captación con reja de fondo del Río Macho, menciona que el incremento en el área de la reja es una medida discutible debido a:

- es imposible predecir el porcentaje de obstrucción de la reja;

- si se incrementa la longitud de la reja, es posible que el material arrastrado se acumule en el tramo en exceso propiciado la oclusión de la reja cuando haya finalizado una crecida; y
- es necesario realizar mantenimiento periódico de este tipo de estructuras.

Adicionalmente, Jiménez y Vargas (2006) recomiendan incrementar la longitud calculada de reja en condiciones de agua clara para considerar el efecto de la oclusión. Generalmente los valores utilizados varían entre el 25% y el 50% de incremento.

1.2.7.10 Andaroodi y Schleiss (2006)

Andaroodi y Schleiss (2006) presentan recomendaciones de diseño de captaciones de fondo para pequeñas centrales hidroeléctricas (entre 1 MW y 10 MW) y señalan que las principales variables para considerar en el diseño son: el espaciamiento entre barras, b_1 , y la distancia entre centros de barras, $b_w + b_1$.

La selección de los valores b_w y b_1 depende del tamaño del material que podría ser captado por la reja sin causar problemas en las estructuras siguientes de un proyecto de generación de electricidad. En este contexto, para el espaciamiento entre barras se recomiendan los valores de 0.02 a 0.04 m.

La pendiente longitudinal de la reja puede variar entre 30° y 45° , basados en la experiencia y en las prácticas comunes de diseño, mientras que la longitud de la reja se debe incrementar un 20% para considerar el efecto de la oclusión.

La forma de las barras también es importante. Andaroodi y Schleiss no recomiendan el uso de barras rectangulares porque se obstruyen más fácilmente y sugieren el uso de barras con la parte superior tipo bulbo o barras con la parte superior en forma de cilindro como se muestra en la Figura 1.45.

Figura 1.45. Perfil de barras para captaciones con reja de fondo según Andaroodi y Schleiss (2006) (a) barra rectangular (no recomendada), (b) barra con parte superior tipo bulbo, y (c) barra con la parte circular en forma de cilindro (recomendada).

1.2.7.11 Influencia del Transporte de Fondo en Rejas con Barras Tipo T (García, 2016)

Para zonas semiáridas es importante determinar las características de capacidad de transporte a partir de un muestreo del material de fondo y considerar los rangos de validez de cada expresión de cálculo y las limitaciones para su utilización.

García (2016) realizó ensayos utilizando tres tipos diferentes de grava cuyos diámetros medios, d_{50} , eran: 8.3 mm (grava 1); 14.8 mm (grava 2) y 22.0 mm (grava 3) como se puede observar en la Figura 1.46.

Según la clasificación de Zingg (García, 2016; Zingg, 1935), la grava 1 y la grava 3 tienen un predominio de formas redondeadas (40% y 43% respectivamente); mientras que la grava 2 tiene caras de fractura (45%), como se presenta en la Tabla 1.11. El primer tipo de grava se ensaya con la reja de $m = 0.22$ mientras que los dos tipos restantes de grava se utilizan para la reja de $m = 0.28$. Las pruebas se realizaron con tres tipos de caudales: 77.0; 114.6 y 155.5 l/s/m en cinco diferentes pendientes (0%, 10%, 20%, 30% y 33%).

Figura 1.46. Curvas granulométricas de las gravas empleadas por García (2016).

Tabla 1.11. Clasificación de Zingg (1935) para la forma de las partículas utilizadas con la reja con barras tipo T ($m = 0.22$ y 0.28).

Descripción	d_{50} (mm)	Cuchilla	Disco	Barra	Esfera
Grava1	8.30	5%	25%	30%	40%
Grava 2	14.80	5%	45%	15%	35%
Grava 3	22.00	8%	30%	19%	43%

Como resultado de las experiencias en laboratorio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El depósito de sedimento en la reja produce un incremento en el calado sobre la reja, incrementando así el caudal rechazado.

- La mayor cantidad de caudal rechazado se produce al inicio de cada experimento y va disminuyendo hasta alcanzar un valor casi constante.
- Bajas pendientes longitudinales de reja producen mayor cantidad de caudal rechazado (contrario a lo que ocurre en ensayos con agua clara).
- Se define una zona de deposición preferente (una vez ocluida la reja, no se deposita más material), que ocurre cuando el ángulo del vector velocidad con la reja es mayor.
- La eficiencia en la captación para flujos con gravas aumenta con la pendiente longitudinal de la reja hasta el 30%.
- Se define un índice de huecos modificado en función de la oclusión de la reja (índice de huecos efectivo, m') que se puede obtener utilizando la siguiente relación:

$$U_0 \left(\frac{d_{50c}}{b_1} \right) \left(\frac{1}{W^{0.205}} \right) = 3.0684 \left(\frac{m'}{m} \right) + 2.4094 \quad (1.96)$$

Donde: d_{50c} es el diámetro medio del grano considerando la dimensión c del elipsoide — como se verá más adelante en la Figura 5.1.—, b_1 es el espaciamiento entre barras de la reja, W es el peso promedio de las partículas y U_0 es la velocidad al inicio de la reja que puede calcularse utilizando la ecuación (1.97) para obtener el calado al inicio de la reja.

$$\frac{h_0}{h_c} = 0.90 \left(\frac{q_1 \tan \theta}{m} \right) - 0.77 \left(\frac{q_1 \tan \theta}{m} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.82 \quad (1.97)$$

- Las longitudes de la reja recalculadas con el índice de huecos efectivo, m' , van incrementando al disminuir el valor de la pendiente longitudinal y se aproximan a la propuesta de Krochin (1978) para considerar el efecto de la oclusión como se puede observar en la Figura 1.47.

Figura 1.47. Longitud de reja mojada para diferentes caudales entrantes y en función de la pendiente longitudinal de la reja obtenida por García (2016).

1.2.7.12 Castillo et al. (2016)

Se realizaron pruebas con tres tipos de caudales: 0.077; 0.1146 y 0.1555 m³/s/m en cinco diferentes pendientes (0%, 10%, 20%, 30% y 33%) y con tres tipos diferentes de grava cuyos diámetros característicos, d_{50} , eran: 8.3 mm (grava 1); 14.8 mm (grava 2) y 22.0 mm (grava 3). El primer tipo de grava se ensayó con la reja $m = 0.22$ mientras que los dos tipos restantes se utilizaron para la reja $m = 0.28$.

Como resultado de las experiencias en laboratorio se obtuvo el índice de huecos efectivo, m' , aplicando el algoritmo Runge-Kutta de cuarto orden para incrementos de longitud de 0.02 m a las ecuaciones (1.75) y (1.98), considerando la longitud total de la reja ($L = 0.90$ m) y el caudal rechazado en cada ensayo realizado. Los resultados se presentan en ábacos como la Figura 1.48.

Figura 1.48. Índice de huecos efectivo para el caso de la reja $m = 0.28$ y grava 2 (Castillo et al., 2016).

$$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75\left(\frac{x}{h_c}m\right)}}{(1 + 0.90tg\theta)} \quad (1.75)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2m'C_{qH}\sqrt{(H_0 + xsen\theta)(H_0 + xsen\theta - hcos\theta)} + hsen\theta}{3hcos\theta - 2(H_0 + xsen\theta)} \quad (1.98)$$

Adicionalmente, se presentan relaciones entre los valores de m'/m (factor de oclusión) y algunos parámetros hidráulicos (al inicio de la reja) como la velocidad, el Número de Froude, el esfuerzo cortante o el Número de Froude densimétrico de las partículas y se obtuvo como resultado la ecuación (1.99) que permite obtener el valor del índice de huecos efectivo:

$$\frac{U_0 d_{50c}}{b_1 W^{0.205}} = 3.068 \frac{m'}{m} + 2.409 \quad (1.99)$$

Donde U_0 es la velocidad media al inicio de la reja, d_{50c} es el diámetro característico del lado más angosto del elipsoide, y W es el peso promedio de las partículas que pueden ser retenidas en la reja. El ajuste realizado para obtener la expresión anterior se presenta en la Figura 1.49. El factor de correlación, R^2 , es de 0.71.

Figura 1.49. Ajuste lineal propuesto para obtener el valor del índice de huecos efectivo para rejillas con barras tipo T (Castillo et al., 2016).

1.2.7.13 Otras recomendaciones para el diseño

En regiones andinas, se recomienda que las captaciones con reja de fondo cumplan con las siguientes características (Castro, 2005):

- Se ubiquen en un tramo de río de longitud adecuada para garantizar el ingreso del caudal de diseño (Fernández-Jáuregui et al., 1991).
- Dispongan de una sección de cierre sobre el que se ubicará la reja de fondo sobre una porción de la sección transversal del río. La reja debe tener una inclinación suficiente en el sentido del flujo, normalmente mayor que la pendiente longitudinal del río.
- La altura del tramo restante de azud de cierre debe ser mayor a la altura de la reja, con lo que el agua circulará sobre la reja, aún para los caudales mínimos.
- Se debe considerar un incremento del área de captación de la reja para compensar el porcentaje de superficie que puede ser ocluida (Drobir, 1981; García, 2016; Krochin, 1978).
- Simmler (1978) propone disponer de un cuenco de retención de sedimentos aguas arriba de la reja para poder contener los de gran tamaño además de favorecer la reducción de la velocidad antes de la reja.

1.2.8 OBJETIVOS DE LA TESIS

1.2.8.1 Objetivo General

El principal objetivo es proponer una metodología de cálculo de las dimensiones de la reja de captación de fondo, que incorpore las recomendaciones de diseño óptimas presentes en la literatura técnica, y aquellas obtenidas utilizando mediciones en laboratorio que permitan maximizar la captación de caudal líquido y reducir la captación de sedimentos. Para conseguirlo se tomará en consideración parámetros como: pendiente longitudinal de la reja, índice de huecos, tipo de barras.

1.2.8.2 Objetivos Específicos

- Definir los parámetros de diseño más influyentes —como la pendiente longitudinal, el espaciamiento entre barras y tipo de barras— para dimensionar la reja de captaciones de fondo para maximizar la captación de caudal líquido y minimizar el caudal sólido captado.
- Ajustar los coeficientes de descarga que relacionan el caudal entrante con la carga hidráulica para el caso rejas con barras circulares.
- Establecer el rendimiento de caudal captado por unidad de longitud de reja, y calado del agua sobre reja de fondo para flujo con alta carga de sedimentos.
- Desarrollar un software de dimensionamiento de las rejas que conforman los sistemas de captación de fondo para su uso generalizado.

CAPITULO 2

SISTEMA DE CAPTACIÓN DE REJA DE FONDO CONSTRUIDO

2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE FONDO CONSTRUIDO EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UPCT

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT, cuenta con un sistema de captación de fondo que se construyó en el año 2011 (Figura 2.1) y que fue diseñado basado en las experiencias de Nosedá (1956a, 1956b).

Figura 2.1. Esquema del sistema de captación de reja de fondo construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT.

El sistema de captación, que se puede observar en la Fotografía 2.1, consta de los siguientes elementos:

Fotografía 2.1. Sistema de captación de reja de fondo construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT.

2.1.1 ARQUETA DE TOMA

Se trata de un pozo que recoge los caudales que provienen del depósito antes de su incorporación al canal de aproximación (Fotografía 2.2). Sus dimensiones interiores son 1.00 m de ancho x 1.00 m de largo x 1.66 m de altura. En la parte inferior del tanque se encuentra un desagüe que devuelve el agua al sistema de recirculación que alimenta el depósito.

(a)

(b)

Fotografía 2.2. Arqueta de toma (a) Vista frontal, y (b) Vista superior.

2.1.2 CANAL DE APROXIMACIÓN

Se trata de un canal de 5.00 m de longitud (distancia entre la arqueta de toma y la reja de fondo). El ancho del canal es de 0.50 m y tiene paredes de metacrilato (espesor de 15 mm) de 0.30 m de altura. Los paneles de la pared tienen refuerzos angulares de acero de 50x50x5 mm apoyados sobre perfiles cuadrados de 100x100 mm, colocados aproximadamente cada metro. Para poder regular la pendiente, el canal cuenta con un husillo de recorrido de 50 mm.

El canal cuenta además con un dispositivo móvil que se desplaza longitudinal y transversalmente que permite la instalación de instrumentos de medida como el limnómetro que se puede observar en la Fotografía 2.3.

Fotografía 2.3. Canal de aproximación.

2.1.3 REJAS DE BARRAS LONGITUDINALES

Las rejatas utilizadas en el presente estudio fueron realizadas con perfiles tipo T y perfiles circulares (Fotografía 2.4) dispuestos de forma paralela a la circulación del flujo. Las rejatas pueden abatirse con respecto a un eje al inicio de la estructura que permite adoptar diferentes pendientes.

Fotografía 2.4. Reja de fondo (a) Reja con barras tipo T ($m = 0.16$), y (b) Reja con barras circulares ($m = 0.28$).

La Tabla 2.1. presenta las características geométricas de las rejatas y en la Figura 2.2 se puede observar la configuración de las rejatas circulares.

Figura 2.2. Configuración de las rejatas con barras circulares.

Tabla 2.1. Características geométricas de las rejillas.

Tipo de barra (mm)	Espacio entre barras, b_1 (mm)	Índice de huecos	Longitud (m)	Ancho B (m)	Dirección de la reja	Pendiente longitudinal (%)
O30/30	11.7	0.28	0.90	0.50	Longitudinal	0, 10, 20, 30, 33 (35 con gravas)
O30/30	45.0	0.60				
T30/25/2	5.7	0.16	0.90	0.50	Longitudinal	0, 10, 20, 30, 33
T30/25/2	8.5	0.22				
T30/25/2	11.7	0.28				

2.1.4 CANAL DE RECOLECCIÓN DE AGUA CAPTADA Y CONDUCCIÓN AL DESARENADOR

El canal de recogida tiene un ancho de 0.60 m y una pendiente del 5%. Cuando la reja trabaja con la pendiente del 33%, la altura mínima del canal es de 0.40 m. La conducción al desarenador está formada por un canal de planta curva —similar a la conducción del proyecto La Viña (Castillo, 2004; Castillo et al., 2000; Castillo y Marín, 2009).

El canal de forma trapezoidal inicia con un ancho de 0.60 m en la base y continúa con una transición a un canal rectangular de 0.30 m de ancho. El régimen de flujo en el canal es supercrítico para favorecer el arrastre de sedimentos captados hacia el desarenador. La sección del canal de recolección y la conducción se pueden observar en la Fotografía 2.5.

Fotografía 2.5. (a) Canal de recogida de caudales captados, y (b) conducción al desarenador.

2.1.5 DESARENADOR

El desarenador consta de una cámara de 1.50 x 4.00 m con 1.50 m de altura y un desagüe de 0.22 x 0.18 m como se puede observar en Fotografía 2.6. El diseño se realizó siguiendo las recomendaciones del manual de la TIWAG (relación altura-ancho 1.25:1), ajustando las dimensiones al espacio existente en el laboratorio.

Fotografía 2.6. Desarenador (a) Vista frontal, y (b) Vista superior de la cámara.

2.1.6 DESCARGA DE CAUDAL NO CAPTADO

La estructura de descarga (Fotografía 2.7) está conformada por un pozo que recolecta el caudal no captado y lo conduce hacia una pared de ladrillo perforado que actúa como una barrera que favorece la disipación de energía. A continuación de la pared se encuentra el canal de descarga de 1.00 m de ancho, 3.46 m de largo y 1.00 m de altura; en cuyo trayecto final (a 2.14 m del inicio del canal) se ubica un vertedero triangular con un ángulo de 90° en el vértice que permite la medición del caudal rechazado.

Fotografía 2.7. Descarga del caudal rechazado (a) Vista lateral, (b) Pared de ladrillo perforado, y (c) Canal de descarga.

2.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

2.2.1 CAUDALÍMETRO

Para medir el caudal que circula por el canal de aproximación se utiliza un caudalímetro electromagnético de 125 mm Endress Häuser Promag 53W (Fotografía 2.8) que presenta errores en la medición del orden del 0.5%. Las unidades de medición que se emplean con el caudalímetro son m^3/h .

Fotografía 2.8. Caudalímetro electromagnético Endress Häuser.

2.2.2 VERTEDERO TRIANGULAR

Las dimensiones del vertedero triangular con ángulo en el vértice de 90° se presentan en la Figura 2.3.

Figura 2.3. Esquema del vertedero triangular.

Para realizar la calibración del vertedero instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT se realizaron mediciones del caudal total que circula por el sistema (Q_m) utilizando el caudalímetro y de la altura de agua sobre la cresta del vertedero (h_v) utilizando una regleta graduada en centímetros —y colocada para este fin cerca del vertedero en el canal de descarga—. Los valores obtenidos se compararon con la ecuación propuesta por la USBR (USBR; Wahl, 2005) —ecuación (2.1) para este tipo de vertederos— y se obtuvieron los resultados señalados en la Tabla 2.2, que se comparan gráficamente en la Figura 2.4. Con la ecuación (2.1) se obtienen los valores de caudal en m^3/s .

$$Q = 1.3458h^{2.4826} \quad (2.1)$$

Tabla 2.2. Comparación de valores de caudal medidos en laboratorio con respecto a los valores obtenidos utilizando la ecuación 2.1.

h_v (m)	Q_m (m ³ /h)	Q_c (m ³ /h)	h_v (m)	Q_m (m ³ /h)	Q_c (m ³ /h)
5,60	7,50	3,78	21,20	100,00	103,05
8,00	18,50	9,17	23,10	125,00	127,52
9,70	21,50	14,80	24,10	138,00	141,67
10,10	23,50	16,36	24,70	150,00	150,58
12,90	35,00	30,03	26,40	175,00	177,64
13,75	33,10	35,18	27,60	200,00	198,36
13,80	43,00	35,50	27,80	202,50	201,95
16,15	50,00	52,45	29,80	237,50	239,96
16,80	56,60	57,85	30,20	250,00	248,03
17,00	65,00	59,57	31,45	277,00	274,30
18,90	75,00	77,49	34,85	360,00	353,91
20,30	87,90	92,53

Figura 2.4. Gráfico comparativo entre los valores de caudal medidos en laboratorio y los valores calculados con la ecuación (2.1) (USBR).

Como se puede observar en la figura anterior, no se presentan grandes variaciones en los resultados obtenidos con las mediciones en laboratorio, por lo que se elige utilizar la ecuación (2.1) para realizar los cálculos del caudal rechazado para las siguientes pruebas de laboratorio.

2.2.3 LIMNÍMETRO

Para la medición de calados sobre la reja, se utilizó un limnómetro vertical con precisión de ± 0.5 mm en mediciones verticales y ± 1.0 mm en mediciones horizontales. El limnómetro

se desplaza longitudinal y transversalmente sobre el canal de aproximación y sobre la reja de fondo gracias a la instalación de un dispositivo móvil a modo de carro como se puede observar en la Fotografía 2.9.

Fotografía 2.9. Limnómetro instalado sobre el dispositivo móvil en el canal de aproximación.

CAPITULO 3

TRABAJO EXPERIMENTAL EN AGUA CLARA

En la primera fase del trabajo experimental desarrollado a efectos de la presente tesis se realizaron mediciones en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT a fin de caracterizar el comportamiento de la reja con barras circulares en agua clara considerando los siguientes aspectos:

- Determinación del perfil de flujo.
- Estimación del calado al inicio de la reja.
- Estimación de la longitud de reja.
- Cuantificación del caudal de flujo derivado por unidad de longitud de reja (permite el cálculo del coeficiente de descarga).

Las campañas de medición se realizaron considerando diferentes caudales de aproximación y pendientes longitudinales de reja; así como dos configuraciones de reja (índices de huecos, $m = 0.28$ y $m = 0.60$), como se detalla más adelante en este capítulo.

Tomando como punto de partida la metodología de Brunella et al. (2003) para definir el perfil de flujo se obtienen familias de curvas que caracterizan el perfil de la lámina de agua para las rejillas con barras circulares en las dos configuraciones estudiadas, donde se puede observar la influencia de la pendiente longitudinal de la reja.

García (2016) propone ecuaciones generales para el cálculo del coeficiente de descarga estático, C_{q0} , en función del índice de huecos de la reja para tres perfiles de reja (tipo T, circular y prismática redondeada). Los coeficientes estáticos de descarga obtenidos a partir de mediciones en laboratorio en las rejillas con barras circulares se ajustan a esta ecuación propuesta.

Como se menciona en el Capítulo 1, el coeficiente de descarga de una reja de fondo es variable a lo largo de la reja; y para el caso de las configuraciones de reja estudiadas, se presentan expresiones para su estimación.

3.1 PERFIL DE FLUJO

Durante la campaña de laboratorio para determinar el perfil de flujo se tomaron medidas de los calados verticales que conforman el perfil de la lámina de agua utilizando el limnómetro de precisión de ± 0.5 mm. Se ensayaron los dos tipos de reja circular ($m = 0.28$ y $m = 0.60$) con seis diferentes caudales de aproximación ($q_1 = 0.0538; 0.077; 0.1146; 0.1383; 0.1555$ y 0.198 m³/s/m) y cinco pendientes longitudinales de reja ($tg\theta = 0\%; 10\%;$

20%; 30%; 33%). Las mediciones se realizaron cada 0.05 m, partiendo desde 0.50 m aguas arriba del inicio de la reja hasta longitudes donde el calado se acercaba a 0.005 m. El perfil de flujo se midió sobre una barra central y sobre el espacio entre dos barras contiguas.

Las mediciones de laboratorio se procesaron utilizando un software de dibujo —AutoCAD 2017— como se puede observar en el ejemplo de la Figura 2.5a. En la sección que representa la reja de fondo, se realizó la proyección de los calados perpendiculares al plano de la reja a partir de las medidas de calado vertical como se observa en la Figura 2.5b.

Figura 2.5. Perfil de la lámina de agua para un caudal de $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$ y una pendiente del 20% (a) Desarrollo total del perfil, y (b) detalle de la proyección de los calados perpendiculares al plano de la reja en la zona de la reja inclinada.

Como se menciona en el apartado 1.2.2.1, Brunella et al. (2003) proponen una expresión universal para caracterizar el perfil de flujo como se señala en la ecuación siguiente:

$$Z = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \tanh \left(\frac{x}{h_c} m C_{q0} - 1 \right) \right] \quad (1.10)$$

García (2016), utilizando también el parámetro $m C_{q0}(x/h_c)$, plantea una expresión para obtener el perfil de flujo para rejillas con barras tipo T.

$$\frac{h}{h_c}(1 + tg\theta) = 0.56 \left[1 - \tanh \left(\frac{x}{0.46h_c} mC_{q0} - 0.505 \right) 0.94 \right] \quad (1.12)$$

Siguiendo la línea de estas propuestas, se graficaron los valores obtenidos en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT adimensionalizando el calado perpendicular al plano de la reja (h) con el calado crítico (h_c) en función del parámetro $(x/h_c)mC_{q0}$, considerando x como la coordenada longitudinal proyectada sobre la horizontal de la reja.

En la Figura 3.1 y en la Figura 3.2 se presentan los valores medidos sobre barra para las rejas con índices de huecos, $m = 0.28$ y $m = 0.60$, respectivamente. La gráfica de valores en las abscisas negativas corresponde a los 50 cm de tramo de canal de aproximación aguas arriba de la reja mientras que la abscisa 0.0 marca el inicio de la reja.

Figura 3.1. Calado perpendicular al plano de la reja, adimensionalizado con el calado crítico en función del factor $(x/h_c)mC_{q0}$ para la reja con $m = 0.28$ (mediciones realizadas sobre barra).

Figura 3.2. Calado perpendicular al plano de la reja, adimensionalizado con el calado crítico en función del factor $(x/h_c)mC_{q0}$ para la reja con $m = 0.60$ (mediciones realizadas sobre barra).

En la Figura 3.3 se muestra el detalle del perfil de flujo que sobre la reja (a partir de la abscisa 0.0) para las dos configuraciones de reja ensayadas.

Figura 3.3. Detalle del calado perpendicular al plano de la reja adimensionalizado desde el inicio de la reja para las rejas con barras circulares e índices de huecos, $m = 0.28$ y 0.60 .

En estas figuras se pueden observar las siguientes características:

- Influencia de la pendiente longitudinal de la reja, $tg\theta$, en el perfil de flujo en las rejas con índices de huecos de 0.28 y 0.60 , en un rango de valores de $tg\theta$ entre 0% y 33% . Este comportamiento ya lo había reportado García (2016) en su trabajo con rejas con barras tipo T con índices de huecos de 0.16 , 0.22 y 0.28 , y en un rango similar de pendientes longitudinales.
- Formación de familias de curvas del perfil de flujo en función de la pendiente longitudinal de la reja (Figura 3.1 y Figura 3.2).
- Las familias de curvas tienen a converger a partir de un valor determinado de $(x/h_c)mC_{q0}$; (0.8 para $m = 0.28$ y 0.7 para $m = 0.60$).
- La forma del perfil de flujo presenta diferencias para las dos configuraciones de reja ensayadas como se puede observar en la Figura 3.3 que presenta la información medida en laboratorio identificando el índice de huecos de la reja.

Considerando las características mencionadas en el párrafo anterior, se propone una ecuación general para la determinación del perfil de flujo con coeficientes variables en función del índice de huecos y de la pendiente longitudinal de la reja.

$$\frac{h}{h_c} = \frac{c}{(1 + tg\theta)} \left[1 - \tanh\left(\frac{x}{dh_c} mC_{q0} - e\right) f \right] \quad (3.1)$$

Donde: c , d , e , y f son los coeficientes variables de la ecuación (3.1), cuyos valores se presentan en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2.

Los resultados que se obtienen aplicando la ecuación (3.1) —señalados con línea continua—, en comparación con las mediciones realizadas en laboratorio se presentan en la Figura 3.4 y en la Figura 3.5.

Tabla 3.1. Coeficientes c , d , e , y f para la reja con índice de huecos, $m = 0.28$.

$tg\theta(\%)$	c	d	e	f
0	0.51	0.50	0.55	1.01
10	0.53	0.50	0.55	1.01
20	0.54	0.50	0.55	1.01
30	0.56	0.51	0.55	1.01
33	0.565	0.515	0.55	1.01

Tabla 3.2. Coeficientes c , d , e , y f para la reja con índice de huecos, $m = 0.60$.

$(x/h_c)mC_{q0} < 0.70$					$(x/h_c)mC_{q0} \geq 0.70$				
$tg\theta(\%)$	c	d	e	f	$tg\theta(\%)$	c	d	e	f
0	0.43	0.43	1.00	0.95	0	0.70	0.48	0.55	1.00
10	0.43	0.43	1.00	0.95	10	0.63	0.50	0.55	1.00
20	0.47	0.41	1.00	0.90	20	0.68	0.50	0.55	1.00
30	0.48	0.43	1.00	0.90	30	0.75	0.50	0.55	1.00
33	0.45	0.45	1.00	1.02	33	0.80	0.50	0.50	1.02

Figura 3.4. Familia de curvas resultado de los ajustes propuestos para el perfil de la lámina de flujo en rejas con barras circulares y $m = 0.28$.

Figura 3.5. Familia de curvas resultado de los ajustes propuestos para el perfil de la lámina de flujo en rejas con barras circulares y $m = 0.60$.

3.2 CALADO AL INICIO DE LA REJA

Para definir el calado al inicio de la reja se realizaron mediciones de calado vertical en los primeros 10 cm de reja utilizando las rejas con barras circulares, utilizando el limnómetro de precisión de ± 0.5 mm. Las mediciones de calado vertical se procesaron en un software de dibujo (AutoCAD) para obtener el valor del calado perpendicular al inicio de la reja, dado que la reja presenta inclinación en los casos de pendiente mayor a la horizontal. En la Tabla 3.3. se presenta el plan de pruebas ensayado en el laboratorio de la UPCT.

Tabla 3.3. Plan de ensayos realizados en el laboratorio de la UPCT para determinar el calado al inicio de la reja.

Tipo de barra (mm)	Índice de huecos	No. Ensayos	Rango de caudal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Pendiente longitudinal (%)
O30/30	0.28	183	0.0408 – 0.2019	0, 10, 20, 30, 33
O30/30	0.60	153	0.0406 – 0.2038	

Como se menciona en el apartado 1.2.3.4, Frank (1956), propone una expresión para calcular el calado al inicio de la reja en función del calado crítico y de la pendiente longitudinal de la reja, a partir de su hipótesis de que el perfil de la lámina de agua se asemeja a una elipse.

$$h_0 = k_f h_c \quad (1.27)$$

$$2\cos\theta k_f^3 - 3k_f^2 + 1 = 0 \quad (1.28)$$

También, Vargas (1998), en sus recomendaciones finales para el diseño de la reja de una captación de fondo, señala que el calado al inicio es proporcional al calado crítico y que puede considerarse igual a $0.7h_c$ cuando se diseña como un vertedero de cresta ancha.

Partiendo de este concepto, y a fin de comparar los resultados de las mediciones realizadas en laboratorio con estas recomendaciones de diseño realizadas por Frank (1956) y Vargas (1998), se realizaron gráficas del calado al inicio de la reja obtenido con la información de laboratorio con respecto al calado crítico. La Figura 3.6 y la Figura 3.7 muestran el mismo tipo de información; aunque en la primera se realiza la diferenciación con respecto al índice de huecos y en la segunda con respecto a la pendiente longitudinal de la reja.

En la Figura 3.6 se observa que no se presentan diferencias significativas para el valor del calado a inicio de la reja considerando la variación del índice de huecos; mientras que en la Figura 3.7 se puede apreciar que existe influencia de la pendiente longitudinal de la reja en este parámetro.

Figura 3.6. Gráfica del calado al inicio de la reja en función del calado crítico para rejas con barras circulares.

Figura 3.7. Gráfica del calado al inicio de la reja en función del calado crítico para rejas con barras circulares, diferenciando los valores por pendiente longitudinal de reja, para $m =$ (a) 0.28; y (b) 0.60.

Para obtener una expresión que permita realizar la comparación con las recomendaciones de diseño de la literatura técnica, se realizaron gráficas por separado de estos parámetros para cada pendiente ensayada y se aplicó un ajuste lineal como se puede observar en la Figura 3.8, obteniéndose coeficientes de correlación, R^2 que variaban entre 0.98 y 0.99.

$$h_o = ih_c - j \quad (3.2)$$

Donde: i y j son los coeficientes variables que dependen de la pendiente longitudinal de la reja y se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Coeficientes i y j de la ecuación (3.2)

$tg\theta$	0%	10%	20%	30%	33%
i	0.7483	0.7045	0.6903	0.6986	0.6595
j	0.0013	0.0036	0.0061	0.0108	0.0075

Figura 3.8. Gráfica del calado al inicio de la reja en función del calado crítico y ajustes lineales propuestos para diferentes pendientes: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30%; y (e) 33%.

Como ejemplo, se calcula h_0 para valores de caudal de aproximación en un rango de 0.053 y 0.20 m³/s/m para pendientes longitudinales entre 0% y 33%, empleando las ecuaciones (3.2) y (1.27) así como el valor de $0.7h_c$. Los resultados se presentan en la Figura 3.9.

En la figura se puede observar que la propuesta de Vargas (1998) está ligeramente por debajo de los calados obtenidos a partir de las mediciones realizadas en el laboratorio de hidráulica de la UPCT para el caso de la pendiente longitudinal del 0%; mientras que para la pendiente del 33% se presentan diferencias que varían entre 1.0 y 1.4 cm, con lo que se puede evidenciar la influencia de la pendiente longitudinal de la reja en la determinación del calado al inicio de la reja.

Para el caso de los valores obtenidos con la expresión propuesta por Frank (1956) existe una diferencia entre los calados calculados de alrededor de 2 cm para el caudal más bajo considerado y de 4 cm para el caudal más alto, para las dos pendientes longitudinales. En

los dos ejemplos, los valores calculados con la expresión de Frank (1956) son los más altos; sin embargo, cabe destacar que la expresión de cálculo propuesta por Frank incluye la influencia que tiene la pendiente longitudinal de la reja en la estimación del calado al inicio de la reja a diferencia de la recomendación de Vargas (1998) que propone una expresión constante.

Figura 3.9. Comparación entre los valores de calado al inicio de la reja obtenidos con las ecuaciones (1.27) y (3.2) para dos pendientes diferentes: (a) 0%; y (b) 33%.

3.3 COEFICIENTE DE DESCARGA

3.3.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA ESTÁTICO

El coeficiente de descarga estático de la reja, C_{q0} , es aquel que se puede determinar cuando el nivel de flujo permanece casi constante y la velocidad de aproximación del flujo es prácticamente nula —Número de Froude ≈ 0 —, de tal forma que la energía del sistema corresponda únicamente a la energía potencial.

Para obtener el coeficiente de descarga estático de la reja en el modelo de sistema de captación de fondo con barras circulares e índices de huecos de 0.28 y 0.60 construido en el laboratorio, se colocó un tabique vertical sobre la reja —como se observa en la Fotografía 3.1— a una distancia $\Delta L = 0.15$ m para la reja con $m = 0.28$ y $\Delta L = 0.10$ m para la reja con $m = 0.60$; de tal forma que se generó un embalse provisional donde la velocidad de aproximación del flujo era prácticamente nula al alcanzar el tabique y el nivel de agua se mantenía prácticamente constante. En estas condiciones, y conocido el caudal de ingreso al canal de aproximación, se realizaron mediciones del calado alcanzado por el agua, h , para diferentes caudales (7 en el caso de $m = 0.28$ y 5 para $m = 0.60$).

El cálculo de C_{q0} se realizó aplicando la siguiente ecuación:

$$C_{q0} = \frac{q_1}{\Delta L m \sqrt{2gh}} \quad (3.3)$$

Fotografía 3.1. Formación del embalse provisional sobre la reja para la estimación del coeficiente de descarga estático de la reja.

Los resultados obtenidos con la ecuación (3.3) —para cada índice de huecos— presentan en la Figura 3.10. El valor de C_{q0} que se reporta para cada tipo de reja corresponde al promedio de los valores calculados para cada par de caudal y calado medidos.

Figura 3.10. Coeficiente de descarga estático obtenido en laboratorio (a) $C_{q0} \approx 1.1646$ para la reja con $m = 0.28$, y (b) $C_{q0} \approx 0.8997$ para la reja con $m = 0.60$.

Como se mencionó en el apartado 1.2.3.21, García (2016) propone la ecuación (1.72) para la estimación del coeficiente de descarga estático en rejas con barras circulares que se compara con los valores obtenidos con las mediciones en laboratorio en la Tabla 3.5.

$$C_{q0} = 1.4287e^{-0.771m} \quad (1.72)$$

Tabla 3.5. Comparación de los valores de C_{q0} obtenidos con información de laboratorio y calculados con la ecuación (1.72)

m	C_{q0}		
	Laboratorio	Ecuación (1.72)	Diferencia
0.28	1.1646	1.1513	1.14%
0.60	0.8997	0.8995	0.02%

Los valores de coeficiente de descarga estático obtenidos con la ecuación (1.72) presentan diferencias muy pequeñas con respecto a los resultados obtenidos con las mediciones en

laboratorio; por lo que, en adelante, se adoptará la ecuación propuesta por García (2016) para el cálculo de C_{q0} .

3.3.2 COEFICIENTE DE DESCARGA VARIABLE A LO LARGO DE LA REJA

Para determinar el coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja, $C_{qH}(x)$, se realizaron mediciones de caudal rechazado considerando la derivación de tramos de 0.05 m (acumulados) a lo largo de la reja. Para este fin se empleó una lámina de metal de 0.50x0.90 m con la que se cubría parcialmente la reja como se muestra en la Figura 3.11. Este procedimiento se basa en la hipótesis de que el flujo sobre la reja se encuentra en régimen supercrítico; por lo que el efecto que produce la lámina de metal sobre el flujo aguas arriba es mínimo.

Figura 3.11. Esquema de la utilización de la lámina de metal para la medición del caudal captado por tramos: (a) primer tramo de 0.05 m, y (b) tercer tramo de 0.15 m.

El caudal de aproximación, q_1 , se estimaba con ayuda del caudalímetro mientras que el caudal rechazado, q_2 , se medía con ayuda del vertedero triangular ubicado en el canal de descarga. El caudal derivado por tramos se calcula con:

$$q_{dacum} = q_1 - q_2 \quad (3.4)$$

El procedimiento finalizaba cuando el caudal de aproximación era captado totalmente por la reja o cuando la cantidad de caudal rechazado era tan pequeño que no se podía estimar con precisión con ayuda del vertedero.

Los ensayos se realizaron para las rejas con barras circulares ($m = 0.28$ y $m = 0.60$), empleando seis caudales de aproximación ($q_1 = 0.0538$; 0.077; 0.1146; 0.1383; 0.1555 y 0.198 m³/s/m) y cinco pendientes ($tg\theta = 0\%$; 10%; 20%; 30%; 33%).

De manera general, el caudal captado por tramo de reja se puede calcular aplicando:

$$\frac{dq}{dx} = C_{qH}(x)m\sqrt{2g(H_0 + xsen\theta)} \quad (3.5)$$

Esta expresión se basa en la ecuación (1.2), con las siguientes hipótesis de cálculo:

- El coeficiente de descarga, $C_{qH}(x)$, cambia a lo largo de la reja,
- H_0 corresponde a la energía mínima para el caudal de aproximación, q_1 ,
- El nivel de energía se mantiene constante ($H_0 + x \sin \theta$).

Para determinar si la hipótesis de nivel de energía constante es adecuada se calculó la energía total de cada tramo de reja, utilizando las mediciones de calados verticales —que se mencionan en el apartado 3.1— así como el caudal derivado para cada tramo de 0.05 m de reja; y aplicando la ecuación (1.4) modificada como:

$$H = z + h \cos \theta + \frac{q(x)^2}{2gh^2} \quad (3.6)$$

Donde z es el nivel de referencia del sistema.

Con los valores de energía total calculados utilizando la ecuación (3.6) se realizaron gráficas como las que se presentan en la Figura 3.12, donde se puede observar la energía total y la línea de energía mínima (calculadas) sobre el perfil de flujo y de la reja. Aunque en el caso de la pendiente 30%, se puede observar una mayor desviación de los puntos que constituyen la línea de energía total con respecto a la línea de energía mínima —que se presenta debido a que la distribución de presiones no es hidrostática—, se comprueba empíricamente que la hipótesis de nivel de energía constante representa una aproximación adecuada para este caso (Carrillo et al., 2018b).

Figura 3.12. Energía total a lo largo de la reja para un caudal $q_1 = 155.5 \text{ l/s/m}$ y pendientes longitudinales de reja (a) del 10%, y (b) del 30%.

Con las mediciones de caudal derivado por tramos de 0.05 m de reja —que se mencionan al inicio de este apartado— y la ecuación (3.5) se pueden obtener los valores de coeficiente de descarga presentados a lo largo de la coordenada x , $C_{qH}(x)$. En la Figura 3.13 se puede observar la variación del coeficiente de descarga a lo largo de reja y la influencia de la pendiente longitudinal en este parámetro que para el caso de $m = 0.28$ se distingue a lo

largo de toda la reja; y en caso de $m = 0.60$ es más apreciable en valores de $(x/h_c)m$ menores a 0.96. También se puede observar que el valor del coeficiente de descarga variable alcanza valores mayores en el caso de la reja con índice de huecos menor ($m = 0.28$).

Figura 3.13. Variación de $C_{qH}(x)$ en función del parámetro $(x/h_c)m$ para rejas circulares con índices de huecos (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.

Con estas consideraciones, e introduciendo el factor $(1+tg\theta)$ de la pendiente longitudinal de la reja, se proponen ecuaciones para estimar el coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja, de acuerdo con el índice de huecos.

Adicionalmente, para definir el coeficiente de descarga variable, se ha adoptado la hipótesis de que el calado al inicio de la reja con barras circulares corresponde al 90% del calado crítico, a fin de establecer un parámetro que establecerse fácilmente, dado que el calado al inicio de la reja presenta una variabilidad que depende de las condiciones de aproximación del flujo así como del índice de huecos de la reja.

$$\text{Para } m = 0.28: \quad C_{qH} \approx \frac{1 - 0.15 \left[1 - 0.51(1 - 0.45tg\theta) \left(\frac{x}{h_c} m \right) \right]^{-2.7}}{1 + tg\theta} \quad (3.7)$$

Para $m = 0.60$:

$$(x/h_c)m < 0.96 \quad C_{qH} \approx \frac{1 + 0.2tg\theta}{1 + tg\theta} \left[0.145 \left(\frac{x}{h_c} m \right) + 0.50 \right] \quad (3.8)$$

$$(x/h_c)m > 0.96 \quad C_{qH} \approx \frac{1 + 0.2tg\theta}{1 + tg\theta} \left[0.4856 \left(\frac{x}{h_c} m \right)^{-6.021} \right] \quad (3.9)$$

En la Figura 3.14 se representa el valor del coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja C_{qH} , considerando la influencia de la pendiente longitudinal a través del factor $(1+tg\theta)$ en función del parámetro adimensional $(x/h_c)m$.

Figura 3.14. Variación de $C_{qH}(x)$ en función del parámetro $(x/h_c)m$ y tendencia de los ajustes propuestos para las rejillas circulares con índices de huecos (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.

Para demostrar la precisión de los ajustes propuestos con las ecuaciones (3.7) a (3.9), en la Figura 3.15 y Figura 3.16 se presentan comparaciones entre los datos de calado y el caudal derivado a lo largo de la rejilla medidos en laboratorio y los valores de estos mismos parámetros producto de la resolución numérica de la ecuación (1.71) con los ajustes propuestos de $C_{qH}(x)$, utilizando el método Runge-Kutta de cuarto orden para incrementos de longitud de 0.005 m.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}\sqrt{(H_0 + xsen\theta)(H_0 + xsen\theta - hcos\theta)} + hsen\theta}{3hcos\theta - 2(H_0 + xsen\theta)} \quad (1.71)$$

Las mediciones de laboratorio y las ecuaciones propuestas presentan buena concordancia; aunque se debe mencionar que estas simulaciones se realizaron considerando que el calado al inicio corresponde a $0.90h_c$ y por esta razón se puede observar una desviación

al inicio de las gráficas del perfil de flujo calculadas puesto que en la realidad el calado al inicio de la reja puede resultar menor que el 90% del calado crítico.

Figura 3.15. Comparación entre valores medidos en laboratorio y calculados con las ecuaciones (1.71) y (3.7) del perfil de flujo y del porcentaje de caudal acumulado para $m = 0.28$.

Figura 3.16. Comparación entre valores medidos en laboratorio y calculados con las ecuaciones (1.71), (3.8) y (3.9) del perfil de flujo y del porcentaje de caudal acumulado para $m = 0.60$.

Con la información de campaña de laboratorio para la reja con índice de huecos $m = 0.28$, Carrillo et al. (2018b) realizaron modelaciones numéricas utilizando la Dinámica de Fluidos

Computacional (CFD) a través del software ANSYS CFD, y obtuvo el coeficiente de descarga a partir del valor del seno del ángulo que el vector velocidad forma con el plano de la reja (Castillo et al., 2016).

En la Figura 3.17 y en la Figura 3.18 se presenta la comparación entre los valores de coeficiente de descarga a lo largo de la reja para los caudales de aproximación, $q_1 = 53.8$; 114.6 y 198.0 l/s/m y pendientes del 10% y 30%, donde se observa, además, que la propuesta de Righetti y Lanzoni (2008) sobre el ángulo que forma el vector velocidad con el plano de la reja, es válida para las rejillas con barras circulares.

Figura 3.17. Comparación del coeficiente de descarga a lo largo de reja para $m = 0.28$ y $tg\theta = 10\%$ (Carrillo et al., 2018b).

Figura 3.18. Comparación del coeficiente de descarga a lo largo de reja para $m = 0.28$ y $tg\theta = 30\%$ (Carrillo et al., 2018b).

En las figuras, en general, se observa que los valores presentan un buen ajuste con los datos obtenidos en laboratorio, introduciendo el factor $(H_0/H_{min})^{0.5}$, que considera la relación entre el nivel de energía al inicio de la reja resultado de las mediciones y el nivel de energía horizontal (H_{min}) supuesto para obtener la ecuación (3.7).

3.4 LONGITUD DE LA REJA

Drobir et al. (1999), identificó dos longitudes características en el flujo sobre una reja de fondo, L_1 que es la longitud máxima que alcanza el flujo entre dos barras y L_2 que es la máxima longitud mojada sobre la reja —que en el desarrollo de la presente tesis, se denomina como la longitud de la reja, L —, como se puede observar en la Fotografía 2.10.

Fotografía 2.10. Longitudes L_1 y L propuestas por Drobir et al. (1999).

Para el caso de las rejillas con barras circulares e índices de huecos, $m = 0.28$ y 0.60 , en laboratorio, y con ayuda del limnómetro y una cinta métrica graduada en milímetros se procedió a tomar mediciones de las longitudes L_1 y L para diferentes caudales de aproximación, q_1 .

El limnómetro permite ubicar la sección de barra en la que se termina cada una de las longitudes y se proyecta hacia la cinta métrica graduada. Los valores de longitud medidos corresponden a la distancia horizontal desde el inicio de la reja y posteriormente se calculaba la distancia inclinada utilizando el valor de la pendiente longitudinal.

Se ensayaron doce caudales de aproximación diferentes para cada configuración de reja en el rango de $q_1 = 0.018$ a $0.215 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ con cuatro o cinco pendientes longitudinales de reja ($\tan \theta = 0\%$; 10% ; 20% ; 30% ; 33%) como se presenta en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Ensayos realizados para determinar las longitudes L_1 y L de la reja.

Tipo de barra (mm)	Índice de huecos	No. Ensayos	Parámetro medido	Rango de caudal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Pendiente longitudinal (%)
O30/30	0.28	60	L	0.0183 – 0.1882	0, 10, 20, 30, 33
O30/30	0.60	60	L	0.0283 – 0.2154	
O30/30	0.28	48	L_1	0.0180 – 0.2273	0, 10, 20, 30
O30/30	0.60	48	L_1	0.0193 – 0.2246	

El análisis correspondiente a la longitud L_1 , se la presenta a continuación en el apartado 3.4.1; mientras que, el desarrollo correspondiente a la longitud L se realizará más adelante, en el Capítulo 4, empleando análisis empírico, dimensional e inspeccional y se lo comparará con los resultados presentados por Drobir et al. (1999).

3.4.1 LONGITUD L_1

Como se menciona en el apartado 1.2.3.15, Drobir et al. (1999) obtiene la ecuación (1.55) para la estimación de la longitud L_1 de una reja circular con pendiente longitudinal del 20% e índice de huecos de 0.60, con lo que sugiere que existe una relación entre la longitud de la reja y el caudal de aproximación, que puede variar en función de la inclinación de la reja y el índice de huecos.

$$L_1 = 0.9088q_1^{0.4993} \quad (1.55)$$

Considerando este antecedente se realizaron gráficas que relacionan el caudal con las longitudes de reja L_1 medidas en el laboratorio, como se muestra en la Figura 3.19. En esta figura se puede observar que existe influencia de la pendiente al momento de caracterizar la longitud L_1 ; aunque se aprecia de mayor manera en el caso de la reja con índice de huecos, $m = 0.60$.

Figura 3.19. Gráfica de la longitud máxima entre dos barras, L_1 en función del caudal de aproximación para las rejillas (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.

Para calcular numéricamente la longitud que alcanza el flujo entre dos barras consecutivas, L_1 , y poder comparar con los valores experimentales, se aplicó el método Runge Kutta de cuarto orden a las ecuaciones de $C_{qH}(x)$: (3.7) para la reja con $m = 0.28$; y (3.8) y (3.9) para $m = 0.60$, junto con la ecuación (1.71) de perfil de la lámina de agua, considerando que el calado para iniciar el cálculo, h_0 , es igual a $0.90h_c$ que es la condición con la que se ajustaron las ecuaciones de coeficiente de descarga variable. La comparación entre las longitudes L_1 medidas y calculadas se presentan en la Figura 3.20 y Figura 3.21.

Figura 3.20. Comparación entre los valores de L_1 experimentales y calculados para $m = 0.28$.

Figura 3.21. Comparación entre los valores de L_1 experimentales y calculados para $m = 0.60$.

Los valores calculados de la longitud L_1 con el método de Runge Kutta de cuarto orden se obtuvieron para porcentajes de caudal captado de alrededor del 96% y 97% para las rejillas con índices de huecos de 0.28 y 0.60 respectivamente, alcanzando calados menores a 0.003 m; lo que se considera un ajuste adecuado.

CAPITULO 4

ANÁLISIS EMPÍRICO, DIMENSIONAL E INSPECCIONAL

4.1 INTRODUCCIÓN

Al realizar modelos reducidos de estructuras hidráulicas de control, la simulación del flujo exige que se cumplan los tres tipos de similitud: geométrica, dinámica y cinemática. Sin embargo, no es posible alcanzar paralelamente la similitud dinámica de todas las fuerzas que intervienen en determinado fenómeno físico, por lo que la aplicación de estas leyes se restringe a las fuerzas predominantes (Escuela Politécnica Nacional, 2006).

En este caso particular, de sistemas de captación con reja de fondo, se puede señalar:

- Al inicio de la reja, la derivación de caudal se produce principalmente debido a la fuerza de gravedad (Similitud de Froude) y a la geometría de la reja.
- Al final de la reja, la fuerza de tensión superficial hace que el flujo se adhiera a la reja, afectando a la medición de la longitud.
- Las fuerzas viscosas tienen una influencia importante cuando se tienen Números de Reynolds bajos. (Brunella et al., 2003 considera que se presentan efectos de escala en Números de Reynolds menores a 2.5×10^5 cuando se asumen condiciones críticas).
- El flujo es espacialmente variado y la profundidad de flujo disminuye a lo largo de la reja. Existe curvatura de la superficie libre del agua (influencia de la tensión superficial – Similitud de Weber).

El análisis dimensional es una herramienta que se utiliza en la determinación de las variables más influyentes en un fenómeno —las más relevantes para una investigación específica— y en la reducción a parámetros adimensionales, empleando el teorema π de Buckingham (Castro, 2007; García et al., 2018a; Heller, 2011).

El teorema π de Buckingham señala que si las dimensiones de las n variables consideradas para definir un fenómeno físico forman una matriz de orden r , se pueden definir $(n-r)$ parámetros π adimensionales (Castro, 2007) de tal forma que:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-r}) = 0 \quad (4.1)$$

Para establecer los parámetros π se debe:

- Escoger r variables repetitivas o básicas de las n variables seleccionadas.
 - ❖ Las variables repetitivas deben contener todas las magnitudes fundamentales presentes en las n variables.
 - ❖ Las variables repetitivas no deben constituir entre sí un parámetro adimensional.

- ❖ La variable dependiente no debe escogerse como variable repetitiva.
- Combinar las variables repetitivas con las demás variables para obtener los números adimensionales (parámetros π).
 - ❖ En problemas relacionados con fenómenos hidráulicos donde intervienen las magnitudes fundamentales de masa $[M]$, longitud $[L]$ y tiempo $[T]$, se recomienda emplear como variables repetitivas a la densidad (ρ), la velocidad (U) y una longitud característica (l), de tal forma que se consigan parámetros hidromecánicos como los números adimensionales de Froude, Reynolds, Weber, entre otros; como parámetros π .

El análisis inspeccional es un método en el cual las condiciones de similitud se establecen utilizando las ecuaciones que gobiernan un fenómeno hidráulico. Estas ecuaciones deben representar el equilibrio de las fuerzas que intervienen en un fenómeno (Méhauté y Hanes, 2005).

Por ejemplo: si se asume que un fluido en un prototipo presenta un equilibrio de fuerzas como: $A + B + C + \dots = 0$; el flujo en el modelo a escala debería cumplir con un equilibrio de fuerzas similar: $a + b + c + \dots = 0$. Entonces, la similitud se podría establecer de forma que las relaciones entre las fuerzas del modelo y del prototipo sean iguales como se presenta en la ecuación (4.2) (Méhauté y Hanes, 2005).

$$\frac{a}{A} = \frac{b}{B} = \frac{c}{C} = \dots \quad (4.2)$$

El uso de el análisis inspeccional permite identificar la importancia de los términos que influyen en el fenómeno y determinar los efectos de escala que resultan de las simplificaciones consideradas durante la investigación; lo que a su vez permite establecer la escala mínima que debería utilizarse para la realización de un modelo físico (Heller, 2011; Méhauté y Hanes, 2005).

El análisis empírico, por su parte, trata del desarrollo algebraico de una expresión de cálculo obtenida a partir de investigación experimental (Sotelo, 1997). Estas formulaciones se utilizan en diseño de estructuras hidráulicas para predecir el comportamiento del flujo con criterio ingenierial a través de procedimientos de ensayo y error (García et al., 2018a).

Si se combinan el análisis dimensional, inspeccional y empírico; se puede comprender de mejor manera el comportamiento de un fenómeno hidráulico y proponer expresiones de cálculo que permitan caracterizarlo.

Para la utilización de estas herramientas de análisis, se consideraron las campañas de laboratorio en rejas con barras circulares descritas en el Capítulo 3 —336 ensayos para

determinar el calado al inicio de la reja según se presenta en la Tabla 3.3, y 216 ensayos para determinar la longitud mojada de la reja como se presenta en la Tabla 3.6—, y mediciones adicionales en rejas con barras tipo T que se describen en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2, siguiendo el procedimiento descrito en los apartados 3.2 y 3.4 de esta tesis.

Tabla 4.1. Ensayos realizados para determinar el calado al inicio de la reja.

Tipo de barra (mm)	Índice de huecos	No. Ensayos	Rango de caudal (m³/s/m)	Pendiente longitudinal (%)
T30/25/2	0.16	141	0.0187 – 0.2072	0, 10, 20, 30, 33
T30/25/2	0.22	114	0.0181 – 0.0969	
T30/25/2	0.28	113	0.0202 - 0.1294	

Tabla 4.2. Ensayos realizados para determinar la longitud mojada de la reja.

Tipo de barra (mm)	Índice de huecos	No. Ensayos	Rango de caudal (m³/s/m)	Pendiente longitudinal (%)
T30/25/2	0.16	57	0.0306 – 0.1119	0, 10, 20, 30, 33
T30/25/2	0.22	60	0.0279 – 0.1216	
T30/25/2	0.28	60	0.0265 - 0.1560	

Dos de las variables importantes en el momento de realizar el diseño de la reja de un sistema de captación de fondo son la longitud de reja necesaria para captar un caudal determinado y la estimación del coeficiente de descarga de la reja. Como se ha mencionado en el apartado 3.3.2, el coeficiente de descarga varía a lo largo de la reja; sin embargo, cuando se realiza el diseño de la estructura hidráulica, se utiliza un coeficiente de descarga promedio con el que se pueda obtener resultados similares en cuanto a caudal derivado y longitud de reja mojada.

Uno de los objetivos de la presente tesis, es desarrollar un software de diseño de la reja de la captación de fondo y pensando en este fin también, se busca proponer una relación que permita estimar este coeficiente de descarga.

García (2016), en su trabajo, sugiere que las variables más importantes que intervienen en la definición del coeficiente de descarga promedio de una reja de captación de fondo son:

$$f(U_0, h_0, \mu, \sigma, \rho, g, tg\theta, m, C_{q0}, \overline{C_{qH}}) = 0 \quad (4.3)$$

Donde: U_0 es la velocidad al inicio de la reja —calculada como la relación entre el caudal específico y el calado al inicio de la reja, q_1/h_0 , μ es la viscosidad dinámica, σ es la tensión superficial, ρ es la densidad del agua, C_{q0} es el coeficiente de descarga estático de la reja —también definido por García (2016) y señalado en el apartado 1.2.3.21—.

$$\text{Barra de sección circular: } C_{q0} = 1.4287e^{-0.771m} \quad (1.72)$$

$$\text{Barra de sección prismática redondeada: } C_{q0} = 1.15e^{-0.771m} \quad (1.73)$$

$$\text{Barra de sección tipo T: } C_{q0} = 0.901e^{-0.771m} \quad (1.74)$$

Para aplicar el teorema π de Buckingham a la ecuación (4.3), se considera:

- Número de variables influyentes: $n = 10$.
- Orden de la matriz de dimensiones de las variables influyentes: $r = 3$.
- Número de parámetros adimensionales que pueden definirse: $n-r = 7$.
- Variables repetitivas seleccionadas: ρ [$L^{-3}M$], U_0 [LT^{-1}], h_0 [L].

Las magnitudes de las demás variables se expresan en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3. Magnitudes de las variables no consideradas repetitivas.

μ	σ	g	$tg\theta$	m	C_{q0}	$\overline{C_{qH}}$
[$L^{-1}MT^{-2}$]	[MT^{-2}]	[LT^{-2}]	[-]	[-]	[-]	[-]

Para obtener los parámetros adimensionales π :

$$\begin{aligned} \pi_1 &= h_0^\alpha \rho^\beta U_0^\gamma \mu^1 \\ [L^0 M^0 T^0] &= [L^\alpha] [L^{-3\beta} M^\beta] [L^\gamma T^{-\gamma}] [L^{-1} M^1 T^{-1}] \\ L: 0 &= \alpha - 3\beta + \gamma - 1 \quad \rightarrow \alpha = 3(-1) - (-1) + 1 = 1 \\ M: 0 &= \beta + 1 \quad \rightarrow \beta = -1 \\ T: 0 &= -\gamma - 1 \quad \rightarrow \gamma = -1 \\ \pi_1 &= \frac{\mu/\rho}{U_0 h_0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi_2 &= h_0^\alpha \rho^\beta U_0^\gamma \sigma^1 \\ [L^0 M^0 T^0] &= [L^\alpha] [L^{-3\beta} M^\beta] [L^\gamma T^{-\gamma}] [M^1 T^{-2}] \\ L: 0 &= \alpha - 3\beta + \gamma \quad \rightarrow \alpha = 3(-1) - (-2) = -1 \\ M: 0 &= \beta + 1 \quad \rightarrow \beta = -1 \\ T: 0 &= -\gamma - 2 \quad \rightarrow \gamma = -2 \\ \pi_2 &= \frac{\sigma/\rho}{U_0^2 h_0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi_3 &= h_0^\alpha \rho^\beta U_0^\gamma g^1 \\ [L^0 M^0 T^0] &= [L^\alpha] [L^{-3\beta} M^\beta] [L^\gamma T^{-\gamma}] [L^1 T^{-2}] \\ L: 0 &= \alpha - 3\beta + \gamma + 1 \quad \rightarrow \alpha = 3(0) - (-2) - 1 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M: 0 &= \beta & \rightarrow \beta &= 0 \\
T: 0 &= -\gamma - 2 & \rightarrow \gamma &= -2 \\
\pi_3 &= \frac{h_0 g}{U_0^2}
\end{aligned}$$

En cuanto a las variables: $tg\theta$, m y C_{q0} que ya son variables adimensionales, se constituyen en los números adimensionales π_4 , π_5 y π_6 que se consideran influyentes en la determinación del coeficiente de descarga promedio. Entonces, se podría expresar la ecuación (4.3) como sigue:

$$\overline{C_{qH}} = f\left(\frac{U_0 h_0}{\mu/\rho}, \frac{U_0^2 h_0}{\sigma/\rho}, \frac{U_0}{\sqrt{g h_0}}, tg\theta, m, C_{q0}\right) \quad (4.4)$$

$$\overline{C_{qH}} = f(Re_0, We_0, Fr_0, tg\theta, m, C_{q0}) \quad (4.5)$$

Donde: Re_0 es el Número de Reynolds; We_0 es el Número de Weber y Fr_0 es el Número de Froude, calculados al inicio de la reja.

A través de la aplicación de análisis empírico e inspeccional a las variables adimensionales presentadas en la ecuación (4.5), se busca encontrar relaciones que permitan estimar las variables que permitan el diseño de una captación con reja de fondo como el calado al inicio de la reja, el coeficiente de descarga promedio y la longitud de reja mojada.

4.2 CALADO AL INICIO DE LA REJA

El criterio básico de similitud que rige a un modelo de captación de rejas de fondo es el criterio de Froude dado que las fuerzas predominantes que actúan en el flujo son las fuerzas de gravedad; por lo que, al realizar un análisis inspeccional del calado al inicio de la reja, partiendo del Número de Froude, se obtiene:

$$\begin{aligned}
Fr_0 &= \frac{U_0}{\sqrt{g h_0}} = \frac{q}{\sqrt{g h_0}^{3/2}} \\
h_0 &= f(q^{2/3})
\end{aligned} \quad (4.6)$$

Si se toma como base la relación de la ecuación (4.6), se puede aplicar un tratamiento empírico a la información de laboratorio (704 ensayos) y realizan gráficas que relacionen el calado al inicio de la reja con respecto al caudal específico de aproximación que permitan obtener ajustes de tipo potencial como el que se presenta en la ecuación (4.7):

$$h_0 = nq^{2/3} \quad (4.7)$$

En la Figura 4.1 hasta la Figura 4.5 se presentan las gráficas de las mediciones en laboratorio con los ajustes propuestos —en líneas entrecortadas (---)— para diferentes inclinaciones de reja (0%, 10%, 20%, 30% y 33%); mientras que los valores del coeficiente n se presentan en la Tabla 4.4. Estos valores varían en función de m y $tg\theta$.

Tabla 4.4. Parámetro n del ajuste propuesto para calcular el calado al inicio de la reja, h_o , en función del caudal de aproximación.

Tipo de barra	m	$tg\theta$				
		0%	10%	20%	30%	33%
Circular	0.28	0,3469	0,3168	0,2992	0,2830	0,2750
Circular	0.60	0,3327	0,3174	0,2950	0,2820	0,2750
Tipo T	0.16	0,3730	0,3314	0,3170	0,3140	0,3010
Tipo T	0.22	0,3700	0,3280	0,2980	0,2800	0,2750
Tipo T	0.28	0,3700	0,3300	0,3080	0,2900	0,2760

Figura 4.1. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares y con índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

Figura 4.2. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares y con índice de huecos, $m = 0.60$ (García et al., 2018a).

Figura 4.3. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T y con índice de huecos, $m = 0.16$ (García et al., 2018a).

Figura 4.4. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T y con índice de huecos, $m = 0.22$ (García et al., 2018a).

Figura 4.5. Calado al inicio de la reja en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T y con índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

Como se puede observar en las figuras anteriores, la ecuación (4.7) presenta un ajuste adecuado para el rango de caudales medidos cuando la pendiente varía entre el 0% y el 20%; sin embargo, para el caso de las pendientes longitudinales altas (30% y 33%), la tendencia del ajuste se puede verificar a partir de un caudal específico, debido a la presencia de efectos de escala (influencia de las fuerzas viscosas). En la Figura 4.1 a la Figura 4.3, se señala con líneas punteadas los valores de caudal donde desaparecen los efectos de escala como se describe en la Tabla 4.5. En el caso de la Figura 4.4 y Figura 4.5, las mediciones del calado al inicio de la reja no pudieron realizarse con valores más altos de caudal debido a las dimensiones de la infraestructura (García et al., 2018a).

Tabla 4.5. Influencia de las fuerzas viscosas en el calado al inicio de la reja.

Tipo de barra	Índice de huecos, m	Pendiente Longitudinal, $tg\theta$	Caudal afectado por la viscosidad ($m^3/s/m$)
Circular	0.28	30%, 33%	<0.10
Circular	0.60	30%, 33%	<0.12
Tipo T	0.16	30%, 33%	<0.15

Después de utilizar el tratamiento empírico, se puede concluir que en los ensayos realizados en laboratorio con caudales de aproximación bajos (Tabla 4.5) empleando las pendientes longitudinales del 30% y 33% para la reja, se presenta influencia de las fuerzas viscosas.

Este fenómeno también se puede observar al relacionar la longitud de reja mojada medida en laboratorio (393 ensayos) con el Número de Froude calculado al inicio de la reja (Fr_o), como se presenta en la Figura 4.6. Esta gráfica presenta una tendencia definida en todos los casos de rejas circulares y tipo T para las pendientes longitudinales del 0%, 10% y 20%. Sin embargo, para el caso de $tg\theta = 30\%$ y 33% esta tendencia se presenta a partir de un determinado valor de longitud mojada. De forma general, se puede considerar que los Números de Froude calculados al inicio de la reja para el caso de valores bajos de longitud mojada tienen influencia de las fuerzas viscosas que es más evidente en el caso de pendientes longitudinales altas (García et al., 2018).

Las características del flujo donde se observa la influencia de las fuerzas viscosas se resumen en la Tabla 4.6. Aquí se observa que para las pendientes longitudinales más altas ensayadas (30% y el 33%) el efecto de las fuerzas viscosas se presenta en las rejas con barras circulares cuando el calado al inicio de la reja tiene valores menores a 0.05 m y afecta un rango de longitudes hasta los 0.50 m (medidos desde el inicio de la reja); en cambio en rejas con barras tipo T, se ven afectadas cuando el valor del calado al inicio es

menor a 0.035 m —aproximadamente— y afecta a un rango de longitudes desde el inicio de la reja hasta los 0.70 m.

Figura 4.6. Número de Froude al inicio de la reja, Fr_0 , en función de la longitud mojada, L_2 para rejas con barras: (a) circulares y $m = 0.28$; (b) circulares y $m = 0.60$; (c) tipo T y $m = 0.16$, (d) tipo T y $m = 0.22$; y (e) tipo T y $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

En la Tabla 4.6 además se presentan los valores del Número de Reynolds calculados al inicio de la reja en el rango donde se observa la influencia de las fuerzas viscosas en el comportamiento del flujo. Estos valores de Re_0 se encuentran entre 103 000 y 111 000 para las rejas con barras circulares y entre 35 000 y 53 000 para las rejas con barras tipo T. Como se mencionó en el apartado 1.2.3.17, Brunella et al. (2003) al proponer su

expresión para calcular el el Número de Reynolds crítico (Re_c), identificaron que valores mayores a 250 000 no se presentan efectos de escala.

Tabla 4.6. Influencia de la viscosidad en la longitud mojada, L , de la reja.

Tipo de barra	Índice de huecos, m	Pendiente Longitudinal $tg\theta$	Longitud afectada por la influencia de la viscosidad (m)	Calado al inicio de la reja, h_0 (m)	Numero de Reynolds Re_0
Circular	0.28	30%, 33%	<0.50	<0.050	<103 080
Circular	0.60	30%, 33%	<0.40	<0.054	<111 313
Tipo T	0.16	30%, 33%	<0.70	<0.032	<35 303
Tipo T	0.22	30%, 33%	<0.70	<0.034	<43 131
Tipo T	0.28	30%, 33%	<0.70	<0.038	<52 777

4.3 RELACIÓN DE LA LONGITUD DE LA REJA CON LOS NÚMEROS ADIMENSIONALES DE REYNOLDS Y WEBER

Como se menciona al inicio de este capítulo, al realizar el análisis dimensional a las variables que se consideran más relevantes en el fenómeno de flujo sobre una captación de reja de fondo, se determinó la influencia de los números adimensionales de Reynolds y Weber. En este apartado, empleando tratamiento empírico, se busca conocer si existen relaciones entre estos dos números adimensionales y la longitud mojada de reja que puedan ayudarnos a proponer expresiones de diseño para las dimensiones de la reja, considerando otras variables relevantes como el índice de huecos y la pendiente longitudinal de la reja.

4.3.1 NÚMERO DE REYNOLDS

Si se realizan gráficas que relacionen el Número de Reynolds al inicio de la reja con la longitud mojada de reja (Figura 4.7) para cada configuración de reja ensayada, se observa que existe una relación potencial entre estos parámetros que varía en función de las diferentes inclinaciones de reja. Esta relación se define en la ecuación (4.8) y se señala con líneas entrecortadas (---) en la Figura 4.7.

Para $m = 0.16, 0.22$ y 0.28

$$Re_0 = o(L^{1.62})$$

Para $m = 0.60$

$$Re_0 = o(L^{2.14}) \quad (4.8)$$

Donde el parámetro o es una constante que depende de la pendiente longitudinal de la reja.

En la ecuación (4.8), se puede observar que los exponentes a los que se eleva la longitud mojada de reja varían con el índice de huecos: para el caso de $m = 0.16$, 0.22 y 0.28 este valor corresponde a 1.62 , independientemente del tipo de barra —tipo T o circular—; mientras que adquiere el valor de 2.14 para $m = 0.60$. Los valores del coeficiente α , en cambio, varían en función de la pendiente longitudinal y del índice de huecos de la reja como se presentan en la Tabla 4.7.

Figura 4.7. Número de Reynolds al inicio de la reja, Re_0 , en función de la longitud mojada, L_2 : (a) rejas con barras circulares y $m = 0.28$; (b) rejas con barras circulares y $m = 0.60$; (c) rejas con barras tipo T y $m = 0.16$, (d) rejas con barras tipo T y $m = 0.22$; y (e) rejas con barras tipo T y $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

Tabla 4.7. Parámetro θ del ajuste propuesto para calcular el Número de Reynolds al inicio de la reja, Re_0 , en función de la longitud de la reja.

Tipo de barra	m	$tg\theta$				
		0%	10%	20%	30%	33%
Circular	0.28	299 092	262 278	229 919	206 702	198 591
Circular	0.60	690 002	560 544	459 517	399 834	370 306
Tipo T	0.16	96 634	81 200	67 101	60 975	58 890
Tipo T	0.22	115 996	97 572	86 843	75 817	73 838
Tipo T	0.28	140 501	122 896	111 349	97 264	89 725

4.3.2 NÚMERO DE WEBER

Al igual que en el apartado anterior, si se realizan gráficas que relacionen el Número de Weber al inicio de la reja y la longitud mojada de reja como se observa en la Figura 4.8, se pueden establecer una relación potencial entre estos parámetros que varía en función de las diferentes pendientes longitudinales de reja. Este ajuste se define en la ecuación (4.9) y se señala con líneas entrecortadas (---) en la Figura 4.8.

Para $m = 0.16, 0.22$ y 0.28

$$We_0 = s(L^{2.16})$$

Para $m = 0.60$

$$We_0 = s(L^{2.86}) \quad (4.9)$$

En la ecuación (4.9), los exponentes a los que se eleva la longitud mojada de reja varían con el índice de huecos de la reja, en este caso: para $m = 0.16, 0.22$ y 0.28 el exponente toma el valor de 2.16, independientemente del tipo de barra; mientras que para $m = 0.60$, este valor corresponde a 2.86. Los valores del coeficiente s , al igual que en el ajuste empleando el Número de Reynolds, varían en función de la inclinación y del índice de huecos de la reja como se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Parámetro s del ajuste propuesto para calcular el Número de Weber al inicio de la reja, We_0 , en función de la longitud de la reja.

Tipo de barra	m	$tg\theta$				
		0%	10%	20%	30%	33%
Circular	0.28	8 103	7 273	6 937	6 092	6 072
Circular	0.60	25 896	21 599	17 262	14 485	13 345
Tipo T	0.16	1 895	1 618	1 431	1 317	1 289
Tipo T	0.22	2 365	2 102	1 909	1 683	1 764
Tipo T	0.28	3 102	2 851	2 637	2 363	2 195

Figura 4.8. Número de Weber al inicio de la reja, We_0 , en función de la longitud mojada, L_2 para rejillas con barras: (a) circulares y $m = 0.28$; (b) circulares y $m = 0.60$; (c) tipo T y $m = 0.16$, (d) tipo T y $m = 0.22$; y (e) tipo T y $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

4.4 COEFICIENTE DE DESCARGA PROMEDIO

Si se consideran las mediciones realizadas en laboratorio de las longitudes totales de captación para las diferentes configuraciones de reja ensayadas, se puede estimar el valor del coeficiente de descarga promedio de la reja, modificando la ecuación (1.3):

$$\overline{C_{qH}} = \frac{q}{Lm\sqrt{2gH_{min}}} \quad (4.10)$$

Donde L corresponde a la longitud de reja mojada medida en laboratorio.

Con los valores calculados a partir de las mediciones de laboratorio empleando la ecuación (4.10), y aplicando tratamiento empírico se propone un ajuste para el cálculo del coeficiente de descarga promedio considerando la variación del índice de huecos y la pendiente longitudinal de la reja:

$$\overline{C_{qH}} = \frac{amC_{q0}}{(1 + tg\theta)^b} q^b \quad (4.11)$$

Donde C_{q0} es el coeficiente de descarga estático propuesto por García (2016) y que se recoge en las ecuaciones (1.72) a (1.74); y los parámetros a y b son constantes que dependen del índice de huecos de la reja que se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Parámetros a y b del ajuste propuesto en la ecuación (4.11) para calcular coeficiente de descarga promedio.

Tipo de barra	m	a	b
Circular	0.60	0.70	0.20
Circular	0.28	1.45	0.05
Tipo T	0.28	1.50	0.05
Tipo T	0.22	2.10	0.05
Tipo T	0.16	3.30	0.05

Como se observa en la Tabla 4.9, el exponente b que afecta al caudal específico, adquiere diferentes valores en función del índice de huecos de la reja —como ocurre en el caso de las relaciones de la longitud mojada con los números adimensionales de Reynolds y Weber en los apartados 4.3.1 y 4.3.2—; para $m = 0.16$, 0.22 y 0.28 corresponde a 0.05 , independientemente del tipo de barra; mientras que para $m = 0.60$, este valor corresponde a 0.20 .

Los valores obtenidos para el coeficiente de descarga promedio utilizando la ecuación (4.10) y el ajuste propuesto en la ecuación (4.11) se presentan en la Figura 4.9 a la Figura 4.13; donde además, se puede observar como influye el índice de huecos de la reja en este parámetro.

Figura 4.9. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares e índice de huecos, $m = 0.60$ (García et al., 2018a).

Figura 4.10. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras circulares e índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

Figura 4.11. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejas con barras tipo T e con índice de huecos, $m = 0.28$ (García et al., 2018a).

Figura 4.12. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejillas con barras tipo T e con índice de huecos, $m = 0.22$ (García et al., 2018a).

Figura 4.13. Coeficiente de descarga promedio en función del caudal de aproximación para rejillas con barras tipo T e con índice de huecos, $m = 0.16$ (García et al., 2018a).

4.4.1 PARÁMETROS PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE DESCARGA PROMEDIO EN REJAS CON BARRAS CUERPO DE PEZ

En la publicación de Orth (1954) se encuentra información de mediciones realizadas en laboratorio para rejillas con barras cuerpo de pez como la que se presenta en la Figura 4.14 y que se resumen en la Tabla 4.10, que pueden utilizarse para estimar el valor del coeficiente de descarga promedio, utilizando la ecuación (4.10).

Tabla 4.10. Parámetros calculados para la información de Orth et al. (1954)

Tipo de barra	$tg\theta$ (%)	m	q (m³/s/m)	L (m)	$\overline{C_{qH}}$
Cuerpo de pez	20%	0.313	0.020	0.36	0.1766
Cuerpo de pez	20%	0.313	0.120	0.62	0.3387

Figura 4.14. Longitud L para rejillas con barras cuerpo de pez, pendiente del 20% y caudal de aproximación de 60 l/s (Orth et al., 1954).

Para calcular el coeficiente de descarga promedio, también se puede utilizar la ecuación (4.11), si se cuentan con información del coeficiente de descarga estático y de los parámetros a y b .

El coeficiente de descarga estático puede estimarse empleando la ecuación general (4.12):

$$C_{q0} = w e^{-0.771m} \quad (4.12)$$

Donde el parámetro w depende del tipo de barra de la rejilla: 0.901 para barras tipo T, 1.15 para barras prismáticas redondeadas, 1.4287 para barras circulares (García, 2016).

Para obtener el valor del parámetro w correspondiente a las barras cuerpo de pez, se considera el valor de coeficiente de descarga estático, $C_{q0} = 0.95$, atribuido a Frank (1956) por Fernández-Jáuregui et al. (1991) y Sotelo (2002), utilizando el índice de huecos, $m = 0.60$, que fue sugerido por Drobir (1981).

El resultado se presenta en la siguiente ecuación:

$$C_{q0} = 1.52 e^{-0.771m} \quad (4.13)$$

En la Figura 4.15 se presentan las curvas del coeficiente de descarga estático calculado con la ecuación (4.12) para los diferentes tipos de barra y se incluyen los valores de C_{q0} de Frank (1956) —Figura 1.15—, asumiendo para cada caso un índice de huecos, $m = 0.60$.

De manera general, en la Figura 4.15, se puede observar que los coeficientes de Frank (1956) están en relación con las expresiones propuestas por García (2016) y con la ecuación (4.13); que es la que se propone para calcular el coeficiente de descarga estático para barras cuerpo de pez.

Figura 4.15. Coeficientes de descarga estáticos calculados con la ecuación (4.12) y valores propuestos por Frank (1956) para los diferentes tipos de barras de reja considerados.

Para obtener el parámetro a , se propone considerar que los valores obtenidos por García et al. (2018a) para rejas con barras tipo T y circulares —Tabla 4.9—; y realizar un ajuste de tipo potencial como se presenta en la Figura 4.16.

Figura 4.16. Gráfico del parámetro a en función de m para rejas con barras tipo T (+), circulares (O).

El resultado del ajuste permite estimar el valor del parámetro a en función del índice de huecos, asumiendo que esta expresión es válida para cualquier tipo de barra:

$$a = 0.37m^{-1.151} \quad (4.14)$$

Conocido el valor del parámetro a —aplicando la ecuación (4.14)—, se puede calcular el valor del parámetro b utilizando la ecuación (4.11). Los resultados se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Valores de los parámetros C_{q0} , a y b calculados para la información de Orth et al. (1954)

Tipo de barra	$tg\theta$ (%)	m	q (m ³ /s/m)	L (m)	$\overline{C_{qH}}$	C_{q0}	a	b
Cuerpo de pez	20%	0.313	0.020	0.36	0.1766	1.1946	1.41	0.233
Cuerpo de pez	20%	0.313	0.120	0.62	0.3387	1.1946	1.41	0.122

Si se analizan los resultados del parámetro b calculados en la Tabla 4.11, se observa que uno de los valores de b parece estar fuera del rango esperado, en comparación con los valores que se presentan en la Tabla 4.9. Sin embargo, vale recordar que, en el apartado 4.2 de este capítulo se menciona la presencia de efectos de escala (influencia de las fuerzas viscosas) en caudales bajos de aproximación, como en este caso. Con esta consideración, se opta por asumir que el valor más representativo del parámetro b , para las barras cuerpo de pez, corresponde a 0.122.

4.5 LONGITUD DE LA REJA

Desde el punto de vista empírico, para obtener una expresión que permita estimar la longitud mojada de reja, L , y tomando como referencia la expresión propuesta por Drobir et al. (1999) —que se presenta en la ecuación (1.56)— se aplica un ajuste de tipo potencial a cada curva $q_1 - L$ presentados en la Figura 4.17.

$$L = 1.7205q_1^{0.4296} \quad (1.56)$$

Figura 4.17. Gráfica de la longitud mojada de la reja, L , en función del caudal de aproximación para las rejillas con barras circulares e índice de huecos (a) $m = 0.28$, y (b) $m = 0.60$.

Como resultado se obtiene la siguiente ecuación general:

$$L = kq_1^I \quad (4.15)$$

Donde los parámetros k y I son coeficientes que dependen del índice de huecos de la reja y de la pendiente longitudinal. Los valores del coeficiente k se presentan en la Tabla 4.12; mientras que el coeficiente I toma el valor de 0.62 para $m = 0.28$ y de 0.46 para $m = 0.60$.

Tabla 4.12. Coeficiente k de la ecuación (4.15).

$tg\theta$	0%	10%	20%	30%	33%
$m = 0.28$	2.187	2.316	2.482	2.553	2.590
$m = 0.60$	1.228	1.277	1.433	1.547	1.567

Ejemplos de las comparaciones de la información de laboratorio con respecto a los ajustes propuestos, se presentan en la Figura 4.18.

Figura 4.18. Comparación entre los valores medidos en laboratorio y los calculados para L .

Como se menciona en el apartado 1.2.2, y desde el punto de vista inspeccional, la ecuación del orificio se utiliza para estimar el caudal específico captado por una captación de reja de fondo — ecuación (1.3)—; de donde, la longitud de reja puede expresarse en función de este caudal:

$$L = \frac{q}{\overline{C_{qH}} m \sqrt{2gH_{min}}} \quad (4.16)$$

Partiendo de la ecuación (4.16), cada variable puede expresarse en función del caudal específico de captación como se presenta en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Parámetros de la ecuación (4.16) en función del caudal específico de captación.

Variable	Expresión en función de q	Observación
H_{min}	$f(q^{2/3})$	Del Número de Froude crítico ($Fr = 1$)
$\overline{C_{qH}}$ ($m = 0.16, 0.22$ y 0.28)	$f(q^{0.05})$	Siguiendo el desarrollo del apartado 4.4
$\overline{C_{qH}}$ ($m = 0.60$)	$f(q^{0.20})$	Siguiendo el desarrollo del apartado 4.4

Si los valores de la Tabla 4.13, se reemplazan en la ecuación (4.16); se obtiene:

$$\text{Para } m = 0.16, 0.22 \text{ y } 0.28: \quad L = f\left(\frac{q}{q^{0.05}\sqrt{q^{2/3}}}\right) = f(q^{0.62}) \quad (4.17)$$

$$\text{Para } m = 0.60. \quad L = f\left(\frac{q}{q^{0.20}\sqrt{q^{2/3}}}\right) = f(q^{0.46}) \quad (4.18)$$

Las ecuaciones (4.17) y (4.18) —planteadas realizando análisis inspeccional— confirman la ecuación (4.15) procedente de tratamiento empírico, para el caso de rejas con barras circulares e índices de huecos de 0.28 y 0.60.

Realizando el mismo procedimiento anterior y considerando los resultados obtenidos en las ecuaciones (4.17) y (4.18), se puede relacionar la longitud de reja mojada con los números adimensionales de Reynolds y Weber.

$$Re_0 = \frac{U_0 h_0}{\mu/\rho} = \frac{\frac{q}{h_0} h_0}{\mu/\rho} = f(q)$$

$$\text{Para } m = 0.16, 0.22 \text{ y } 0.28: \quad Re_0 = f(q) = f(L^{1/0.62}) = f(L^{1.62}) \quad (4.19)$$

$$\text{Para } m = 0.60. \quad Re_0 = f(q) = f(L^{1/0.46}) = f(L^{2.14}) \quad (4.20)$$

$$We_0 = \frac{U_0^2 h_0}{\sigma/\rho} = \frac{\frac{q^2}{h_0^2} h_0}{\sigma/\rho} = f\left(\frac{q^2}{q^{2/3}}\right) = f(q^{4/3})$$

$$\text{Para } m = 0.16, 0.22 \text{ y } 0.28: \quad We_0 = f(q^{4/3}) = f(L^{4/(3*0.62)}) = f(L^{2.14}) \quad (4.21)$$

$$\text{Para } m = 0.60. \quad We_0 = f(q^{4/3}) = f(L^{4/(3*0.46)}) = f(L^{2.86}) \quad (4.22)$$

Es importante mencionar que $h_0 = f(q^{2/3})$ se verifica en el rango de caudales donde no se presenta influencia de las fuerzas viscosas.

4.5.1 COMPARACIÓN CON EL TRABAJO DE DROBIR ET AL. (1999)

Como se menciona en los apartados 1.2.3.15 y 3.4, Drobir et al. (1999) realizaron mediciones en prototipo en captaciones tirolesas que conforman la Central Hidroeléctrica de Sellrain – Silz (Tiroler Kraftwerke AG), para el caso de rejas con barras circulares, índice de huecos de 0.60 y pendiente longitudinal del 20%.

Para el caso de las mediciones realizadas en la UPCT con rejas de barras circulares con índice de huecos de 0.60 y pendiente longitudinal del 20%, se calcula la longitud de reja necesaria para derivar un caudal específico utilizando las ecuaciones (4.11) y (4.16)

propuestas y se las compara con aquellas obtenidas por Drobir et al. (1999) en la Figura 4.19. Aquí se representa la longitud adimensionalizada con el calado crítico en las ordenadas y se coloca en las abscisas el caudal específico de captación.

Figura 4.19. Comparación de longitudes de reja calculadas con la ecuación (4.16) y las propuestas por Drobir et al. (1999) para L_1 y L_2 , incluyendo las mediciones del prototipo (García et al., 2018a).

En la Figura 4.19 se puede observar que la ecuación (4.16) presenta un ajuste adecuado considerando las mediciones realizadas en prototipo, y también que los valores de longitud que se obtienen con esta ecuación son menores que aquellos de la envolvente L_2 .

A la luz de estos resultados, la ecuación (4.16) es la que se propone para realizar el diseño de las dimensiones de la reja de una captación de fondo y será la que se utilizará más adelante en el Capítulo 7, para la realización del programa de dimensionamiento.

CAPITULO 5

TRABAJO EXPERIMENTAL CONSIDERANDO ARRASTRE DE SEDIMENTOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Los problemas que se pueden generar debido al arrastre de sedimentos de un río en la reja de una captación de fondo han sido analizados por varios investigadores que refieren su trabajo a observaciones de prototipos y experiencias personales. En el apartado 1.2.7, se presenta —en resumen— los criterios y recomendaciones de diseño disponibles en la literatura técnica que han sido adoptados en base a la experiencia; y que, sin embargo, se contradicen en algunos puntos como por ejemplo la forma óptima de la barra de la reja para minimizar el efecto de la oclusión.

En cuanto a ensayos realizados en laboratorio utilizando sedimentos, existen pocas referencias como Castillo et al. (2013a, 2013b, 2016); García (2016); García et al. (2018b) que se refieren a ensayos en rejas de fondo con barras tipo T y circulares; y Bina y Saghi (2017) que realizaron ensayos en grillas de fondo con barras circulares.

En las experiencias reportadas de rejas con barras tipo T se determina la pendiente longitudinal óptima de la reja para minimizar la cantidad de material que se deposita sobre la reja y también se define un índice de huecos efectivo, m' , que representa la relación entre el área hueca modificada por la deposición de los sedimentos con respecto al área total inicial. Este valor de m' se utiliza para calcular la longitud de reja necesaria para derivar un determinado caudal considerando los efectos de la oclusión.

En el presente capítulo se describe el trabajo experimental realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT para analizar el fenómeno de oclusión en rejas con barras circulares empleando un flujo con gravas cuyo diámetro medio, d_{50} , se aproxima al espacio entre barras de la reja.

Reproduciendo el trabajo realizado en rejas con barras tipo T (García, 2016), se busca definir el valor de índice de huecos efectivo para rejas con barras circulares y emplear este valor para obtener un parámetro —factor de oclusión— que permita calcular la dimensión longitudinal de la reja considerando el efecto del transporte de sedimentos.

Los resultados obtenidos para las rejas con barras circulares permiten realizar comparaciones con el trabajo previo realizado por García (2016) con barras tipo T que, adicionalmente, proporcionarán criterios para ser considerados en el desarrollo del programa de dimensionamiento de la reja que será tratado más adelante, en el Capítulo 7.

5.2 REJAS CON ÍNDICE DE HUECOS, $m = 0.28$

El fenómeno de oclusión en las rejillas con barras circulares y $m = 0.28$ se evaluó utilizando grava cuyo diámetro característico, d_{50} , era igual a 22.0 mm, con caras redondeadas según la clasificación de Zingg (García, 2016; Zingg, 1935) que se presenta en la Tabla 5.1

Tabla 5.1. Clasificación de Zingg (1935) para la forma de las partículas utilizadas con la rejilla de barras circulares ($m = 0.28$).

d_{50} (mm)	Cuchilla	Disco	Barra	Esfera
22.0	8%	30%	19%	43%

En la Figura 5.1 se esquematizan las longitudes de los ejes de los elipsoides que simulan las formas establecidas por Zingg (1935) donde $a > b > c$; mientras que las curvas granulométricas para las dimensiones b y c de la grava se presentan en la Figura 5.2.

Figura 5.1. Dimensiones de los elipsoides según Zingg (1935).

Figura 5.2. Curvas granulométricas para la grava $d_{50} = 22.0$ mm (a) considerando la dimensión b del elipsoide, y (b) considerando la dimensión c del elipsoide.

Los ensayos se realizaron para cuatro diferentes caudales específicos ($q_1 = 0.1146$; 0.1383 ; 0.1555 y 0.198 m³/s/m) y seis pendientes longitudinales de rejilla ($tg\theta = 0\%$; 10% ; 20% ; 30% ; 33% ; 35%). El caudal de entrada se midió utilizando el caudalímetro digital y el caudal rechazado se estimó con los calados medidos sobre el vertedero triangular.

Para cada prueba, se colocaba una cama de cien kilogramos de grava sobre el fondo del canal de aproximación de manera uniforme. El caudal arrastraba los sólidos desde el fondo del canal hacia la reja. Una parte de la grava era retenida entre las barras, otra parte era captada y otra parte se rechazaba y se recogía en una jaula de metal colocada en el fondo del pozo de descarga (Fotografía 5.1). La jaula se izaba con un mecanismo de poleas que facilita el trabajo de pesar este material. El material retenido entre las barras y el que se captaba y continuaba hacia el desarenador también se pesaba individualmente.

(a)

(b)

Fotografía 5.1. Sistema para recoger el material sólido rechazado (a) jaula de recolección, y (b) mecanismo para levantar y depositar la jaula en el pozo de descarga.

Para los caudales específicos, $q_1 = 0.1146$ y $0.1383 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, el tiempo que tardaba el flujo en arrastrar todo el material era aproximadamente doce minutos; mientras que, para los caudales específicos, $q_1 = 0.1555$ y $0.198 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, era de aproximadamente ocho minutos. Se realizaron 24 ensayos con tres repeticiones por ensayo. En la Fotografía 5.2 se puede observar el flujo de agua arrastrando los sólidos y el detalle de la reja al concluir un ensayo.

(a)

(b)

Fotografía 5.2. Ensayo con gravas (a) flujo de agua con sedimentos, y (b) reja ocluida después de un ensayo.

Al inicio de algunos ensayos, los sedimentos arrastrados se depositaban de forma temporal sobre las rejas —como se puede observar en la Figura 5.3—, generando un represamiento que podría ocasionar el taponamiento de la reja si los sedimentos no fueran arrastrados por el flujo. En laboratorio, este efecto se observó de forma más evidente con los caudales específicos, $q_1 = 0.1146$ y $0.1383 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ con la mayoría de las pendientes longitudinales.

Figura 5.3. Depósito de gravas sobre la reja con pendiente del 30% para un caudal de aproximación de 0.1383 m³/s/m. (a) Vista lateral, y (b) Vista superior.

A fin de realizar una comparación entre la capacidad de captación de la reja obstruida por las gravas con respecto a aquella con agua clara, se realizaron gráficas en las que se representa el porcentaje de caudal derivado como la diferencia entre los caudales de aproximación y los caudales rechazados dividida para el caudal de aproximación, $(q_1 - q_2)/q_1$, en función de las pendientes longitudinales de la reja como se muestra en la Figura 5.4; mientras que los valores de porcentaje de caudal captado durante las pruebas se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Porcentaje de caudal derivado.

Caudal de aproximación (m³/s/m)	Pendiente longitudinal de la reja (%)					
	0	10	20	30	33	35
0.1146	76	77	78	81	80	84
0.1383	69	71	74	76	76	75
0.1555	64	68	71	73	72	74
0.1980	56	62	66	67	67	67

Los valores presentados en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.4 señalan que el incremento en la pendiente longitudinal de la reja no supone una diferencia considerable en el porcentaje de captación de caudal, lo que sí se evidencia en las barras tipo T —que alcanzan la máxima capacidad de derivación con la pendiente del 30%—, según el estudio realizado por García (2016) que se menciona en el apartado 1.2.7.11.

En el caso de rejas con barras circulares, la geometría del espacio entre barras posibilita que gravas de tamaño mayor a éste, pueda quedar retenida debido a que la superficie de contacto entre la barra y la grava es mayor que con otro tipo de barra —un ejemplo se reproduce en la Figura 5.5—. Este fenómeno produce que la fuerza de arrastre del agua no sea suficiente para prevenir la retención de material entre las barras incluso con pendientes del orden del 35% (García et al., 2018b).

Figura 5.4. Porcentaje de caudal derivado en función de la pendiente longitudinal de la reja. (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Figura 5.5. Longitud de contacto grava – barra en el caso de rejillas con barras graficadas desde la que no es recomendable hacia la que resultaría óptima: (a) circulares; (b) cuerpo de pez; y (c), (d), (e) y (f) prismáticas con los bordes redondeados.

En el ejemplo de la Figura 5.5 se marcan con rojo las áreas de contacto grava – barra para diferentes perfiles de barras con el mismo índice de huecos y se puede observar que la barra circular presenta la mayor área de contacto con respecto a los demás perfiles del

ejemplo; y también que en el caso de barras prismáticas con los bordes redondeados, el área de contacto va creciendo proporcionalmente al radio de curvatura de las aristas superiores, alcanzando el máximo valor cuando este radio es igual a la mitad del ancho de la barra; con lo que se concluye que mientras menor sea el radio de curvatura de un perfil, se tiene menor área de contacto grava-barra y se tendría menor deposición de material.

5.2.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE HUECOS EFECTIVO, m'

Cuando existen gravas atrapadas entre las barras de las rejás, el espacio por el que puede circular el caudal se reduce y de esta manera, también varía el índice de huecos. Esta variación que considera el área de espacio entre barras que queda libre de gravas —en la Figura 5.6 se representan como espacios en blanco— con respecto al área total de la reja se conoce como índice de huecos efectivo, m' .

Figura 5.6. Esquema de la reja ocluida para la determinación del índice de huecos efectivo

La primera aproximación para determinar el valor de m' es calcular la reducción del área libre entre barras empleando las fotografías de vista superior de las rejás ocluidas. Estas fotografías fueron procesadas en un software de dibujo (AutoCAD 2017), representando los espacios entre barras obstruidos con gravas con líneas de color rojo, de forma que se pueda cuantificar la cantidad de grava retenida.

Ejemplos de las fotografías de los ensayos y la demarcación de los espacios entre barras ocluidos se muestran en la Figura 5.7. y en la Figura 5.8. Aquí se puede observar que las pendientes más bajas ensayadas presentan la mayor cantidad de gravas retenidas entre las barras circulares; este comportamiento es similar a lo que ocurre con las barras tipo T de acuerdo a los reportes de Castillo et al. (2016) y García (2016). También se observa que no existe mayor variación visual entre la cantidad de material depositado al aumentar el caudal.

En la Figura 5.9 se dividió a la reja en cuatro partes; a fin de cuantificar los espacios ocupados por gravas para cada porción de reja y definir un índice de huecos efectivo parcial que permita identificar la sección con mayor porcentaje de oclusión, que en este caso se constituye el primer cuarto de la reja. Adicionalmente se puede observar que el incremento de caudal y de pendiente reduce el porcentaje de deposición (García et al., 2018b).

Figura 5.7. Vista superior de las rejas ocluidas para $q_1 = 0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$ y diversas pendientes longitudinales. (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 33%, y (f) 35%.

Figura 5.8. Vista superior de las rejillas ocluidas para $q_1 = 0.198 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y diversas pendientes longitudinales. (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 33%, y (f) 35%.

Figura 5.9. Vista superior de las rejillas ocultas, dividiendo la rejilla en cuatro partes y con el índice de huecos calculado para cada parte, para: (a) $q_1 = 0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$ y $\text{tg}\theta = 10\%$, y (b) $q_1 = 0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$ y $\text{tg}\theta = 35\%$. (García et al., 2018b).

Los valores de índice de huecos efectivo producto del procesamiento de fotografías —para los diferentes caudales de aproximación y pendientes longitudinales de rejilla—, se muestran en la Figura 5.10; mientras que en la Tabla 5.3 se presentan los valores promedio de m' y el porcentaje que representa frente al valor inicial de $m = 0.28$.

Figura 5.10. Índice de huecos calculado utilizando fotografías y un software de dibujo, para diferentes pendientes y caudales de aproximación.

Tabla 5.3. Valores promedio del índice de huecos calculado a partir de fotografías.

	Pendiente longitudinal de la rejilla (%)					
	0	10	20	30	33	35
$m'_{\text{fotografías}}$	0.083	0.124	0.151	0.172	0.178	0.187
$m'_{\text{fotografías}}/m$ (%)	30%	44%	54%	61%	64%	67%

De acuerdo con la información que se presenta en la Tabla 5.3, el valor de m' calculado utilizando fotografías presenta un valor creciente a medida que la pendiente longitudinal de la rejilla aumenta desde un 30% del valor inicial del índice de huecos para la pendiente 0% hasta un 67% de m para la pendiente del 35%. Este incremento en el índice de huecos

efectivo calculado a través de las fotografías debería estar relacionado con la cantidad de caudal derivado que se presentó en la Figura 5.4. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 5.11, el incremento en la relación entre el índice de huecos efectivo y el índice de huecos inicial de la reja, $m'_{fotografías}/m$, es mucho mayor que capacidad de captación de la reja ocluida con respecto a la pendiente longitudinal de la reja.

Figura 5.11. Variación de la capacidad de captación de la reja ocluida y de la relación $m'_{fotografías}/m$ en función de la pendiente longitudinal de la reja para (a) $q_1 = 114.6 \text{ l/s/m}$, (b) $q_1 = 138.3 \text{ l/s/m}$, (c) $q_1 = 155.5 \text{ l/s/m}$, y (d) $q_1 = 198.0 \text{ l/s/m}$.

Figura 5.12. Flujo sobre la reja ocluida y formación de estelas en las gravas retenidas para pendientes longitudinales de (a) 20%, (b) 30%.

La diferencia que se observa en la Figura 5.11 se debe a la formación de estelas que se produce cuando el flujo pasa sobre las rejillas obstruidas por las gravas y que no se puede determinar utilizando fotografías. En la Figura 5.12 se puede observar cómo se generan estelas cuando el flujo pasa sobre las gravas, incrementando el efecto de oclusión que se

produce sobre la reja y disminuyendo la cantidad de caudal que finalmente se capta a través de la reja.

Por esta razón, para calcular el índice de huecos efectivo, se propone resolver numéricamente las ecuaciones (1.98) y (3.7) para obtener el perfil de flujo y el caudal derivado a lo largo de la reja, considerando que se conoce el caudal que circula por el canal de aproximación así como el caudal que es rechazado hacia el canal de descarga, lo que permite estimar el caudal derivado como se explicó en el apartado 5.2.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2m' C_{qH} \sqrt{(H_o + x \operatorname{sen} \theta)(H_o + x \operatorname{sen} \theta - h \cos \theta)} + h \operatorname{sen} \theta}{3h \cos \theta - 2(H_o + x \operatorname{sen} \theta)} \quad (1.98)$$

$$C_{qH} \approx \frac{1 - 0.15 \left[1 - 0.51(1 - 0.45 \operatorname{tg} \theta) \left(\frac{x}{h_c} m \right) \right]^{-2.7}}{1 + \operatorname{tg} \theta} \quad (3.7)$$

Para resolver las ecuaciones (1.98) y (3.7), se utiliza el Método de Runge-Kutta de cuarto orden, a través de un proceso de ensayo y error, cambiando el valor del índice de huecos efectivo, m' , hasta que el caudal rechazado calculado al final de la reja sea igual al caudal rechazado que fue medido en laboratorio. Para la resolución numérica se consideran incrementos de longitud, $\Delta x = 0.005$ m hasta completar la longitud total de la reja (0.90 m).

Los resultados de m' obtenidos con este procedimiento se presentan en la Tabla 5.4 y en la Figura 5.13. Los valores promedio calculados considerando todo el rango de caudales ensayados varían desde $m' = 0.071$ ($\operatorname{tg} \theta = 0\%$) hasta $m' = 0.083$ ($\operatorname{tg} \theta = 35\%$).

En la Figura 5.13. se puede observar que existe una importante reducción del índice de huecos debido a la oclusión de las barras de alrededor de los 2/3 del valor inicial como se presenta en la Tabla 5.5.

Figura 5.13. Índice de huecos efectivo, m' , para diferentes pendientes y caudales de aproximación.

De igual manera, si se grafica la capacidad de derivación de la reja ocluida y la relación m'/m con respecto a la pendiente longitudinal de la reja como se muestra en la Figura 5.14, se puede observar que los resultados de índice de huecos obtenidos utilizando métodos

numéricos, presentan una tendencia similar aquella de la capacidad de derivación. En esta figura, se evidencia también que la influencia de la pendiente longitudinal de la reja es limitada y no tan importante en comparación con otros tipos de barras como en el caso de barras tipo T (García, 2016).

Tabla 5.4. Índice de huecos efectivo, m' , calculado a partir de las ecuaciones (1.98) y (3.7).

Caudal de aproximación (m ³ /s/m)	Pendiente longitudinal de la reja (%)					
	0	10	20	30	33	35
0.1146	0.071	0.069	0.069	0.073	0.073	0.077
0.1383	0.071	0.073	0.077	0.079	0.080	0.078
0.1555	0.071	0.075	0.079	0.083	0.083	0.085
0.198	0.071	0.080	0.088	0.091	0.092	0.092

Tabla 5.5. Valores promedio de m' , y porcentaje con respecto al valor inicial de m .

	Pendiente longitudinal de la reja (%)					
	0	10	20	30	33	35
m'	0.071	0.074	0.078	0.081	0.082	0.083
m'/m (%)	25%	27%	28%	29%	29.2%	29.6%

Figura 5.14. Variación de la capacidad de captación de la reja ocluida y de la relación m'/m en función de la pendiente longitudinal de la reja para $q_1 =$ (a) 114.6 l/s/m, (b) 138.3 l/s/m, (c) 155.5 l/s/m, y (d) 198.0 l/s/m.

El perfil de la lámina de agua que se obtiene del proceso de cálculo del índice de huecos efectivo se compara con las fotografías de los ensayos de laboratorio y las mediciones del perfil de flujo obtenidas con agua clara en la Figura 5.15 hasta la Figura 5.19.

Figura 5.15. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculado para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos en laboratorio para la pendiente del 0% y $q_1 =$ (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Figura 5.16. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculado para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para la pendiente del 10% y $q_1 =$ (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Figura 5.17. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculado para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para una pendiente del 20% y $q_1 =$ (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Figura 5.18. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para una pendiente del 30% y $q_1 =$ (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Figura 5.19. Perfil de flujo sobre la reja medido en laboratorio para agua clara (***) y calculados para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos para una pendiente del 33% y $q_1 =$ (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

En la Figura 5.20, para $\text{tg}\theta = 35\%$, se muestra únicamente el perfil de flujo calculado con métodos numéricos superpuesto a las fotografías del ensayo de laboratorio, puesto que no se realizaron mediciones de perfil en condiciones de agua clara.

En las figuras se puede observar que el perfil de flujo calculado utilizando métodos numéricos y el índice de huecos efectivo, m' , presenta un buen ajuste con respecto al perfil de flujo de las fotografías de los ensayos; mientras que al compararlo con el perfil de flujo en agua clara, se observa que las gravas retenidas entre las barras generan un incremento

en el calado y en la longitud de reja necesaria para captar el caudal de diseño —que en todos los casos, es mayor que la longitud disponible de reja en el laboratorio (0.90 m)—.

Figura 5.20. Perfil de flujo sobre la reja calculado para flujo con gravas (—) superpuestos a fotografías de los ensayos en laboratorio para una pendiente del 35% y $q_1 =$ (a) $0.1146 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0.1383 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0.1555 \text{ m}^3/\text{s/m}$, y (d) $0.198 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

5.3 REJAS CON ÍNDICE DE HUECOS, $m = 0.60$

El fenómeno de oclusión en las rejillas con barras circulares y $m = 0.60$ se evaluó utilizando grava cuyo $d_{50} = 58.0 \text{ mm}$ y con caras redondeadas según la clasificación de Zingg (1935) que se presenta en la Tabla 5.6. Las curvas granulométricas para las dimensiones b y c de la grava se muestran en la Figura 5.21.

Figura 5.21. Curvas granulométricas para la grava $d_{50} = 58.0 \text{ mm}$ (a) considerando la dimensión b del elipsoide, y (b) considerando la dimensión c del elipsoide.

Tabla 5.6. Clasificación de Zingg (1935) para la forma de las partículas con la reja de barras circulares ($m = 0.60$).

d_{50} (mm)	Cuchilla	Disco	Barra	Esfera
58.0	2%	6%	15%	77%

Los ensayos se realizaron para tres diferentes caudales específicos ($q_1 = 0.1555$, 0.198 y $0.250 \text{ m}^3/\text{s/m}$) y cinco pendientes ($\text{tg}\theta = 10\%$; 20% ; 30% ; 33% ; 35%). En este grupo de ensayos, además, se consideraron longitudes variables de reja (desde 0.25 m a 0.45 m). La longitud, L , se estableció de forma que la totalidad del caudal sería derivada, si las pruebas se hubieran realizado con agua clara.

El objetivo principal de esta reducción de longitud es evitar que la deposición del material sobre la longitud original de la reja (0.90 m) produzca un efecto de retención como se puede observar en la Fotografía 5.3. Al irse acumulando el material sólido sobre la reja, el calado aumenta de forma gradual sobre la reja y en el canal de aproximación, reduciendo la velocidad de flujo y la capacidad de arrastre del agua favoreciendo el depósito del material sobre la reja. Este comportamiento no permitiría desarrollar los experimentos de forma adecuada y afectaría a los resultados.

Fotografía 5.3. Efecto de retención sobre la longitud original de la reja: (a) con circulación de caudal, y (b) resultado final de la grava depositada sobre la reja.

Figura 5.22. Uso de la lámina metálica para reducir la longitud original de la reja: (a) longitud mínima utilizada, y (b) longitud máxima utilizada.

Para reducir la longitud original de la reja (Figura 2.2), se utilizó una lámina de metal de $0.50 \times 0.90 \text{ m}$ —como se muestra en la Figura 5.22— que se ajustaba a la longitud

necesaria para cada ensayo con bridas plásticas (que garantizaban que la longitud de reja permaneciera constante durante todo el ensayo). La metodología del ensayo es similar a la utilizada con la reja $m = 0.28$. Se realizaron 15 pruebas y para cada condición se repetía el ensayo tres veces.

En la literatura técnica, al revisar ejemplos sobre la metodología de cálculo de las dimensiones de una reja de fondo, es usual encontrar valores de índice de huecos de alrededor de $m = 0.60$ (Andaroodi y Schleiss, 2006; Krochin, 1978; Lauterjung y Schmidt, 1989) —que se presentan en la Tabla 5.7—. En este tipo de ejemplos también se presentan alternativas para incrementar el área de la reja a fin de compensar el porcentaje que puede obstruirse a causa del arrastre de material sólido.

Tabla 5.7. Valores de m propuestos como ejemplos en la literatura técnica.

Autor	m	b_w	b_1
Andaroodi y Schleiss (2006)	0.50 y 0.667		
Krochin (1978)	0.808	0.0095	0.040
Lauterjung and Schmidt (1989)	0.50	0.020	0.020
Programa Nacional de Riego (2002)	0.611	0.0127	0.020

Un primer paso para definir este incremento es conocer la capacidad de derivación de la reja cuando está ocluida.

De los ensayos realizados con gravas en la reja $m = 0.60$, en la Fotografía 5.4. se muestra el flujo pasando sobre la reja cuando ha arrastrado la totalidad de las gravas, para las diferentes pendientes ensayadas. Se puede observar la depositación de las gravas en los espacios entre barras sin que se consiga derivar el caudal esperado.

Fotografía 5.4. Flujo sobre la reja para el caudal de aproximación de 155.5 l/s/m y diferentes pendientes: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 33%, y (e) 35%.

Al igual que en el caso de la reja con barras circulares y $m = 0.28$, para cada pendiente se representa la diferencia entre el caudal de aproximación y el caudal rechazado dividida para el caudal de aproximación, incluyendo los valores de agua clara; el resultado se presenta en la Figura 5.23. y en la Tabla 5.8.

Figura 5.23. Porcentaje de caudal derivado en función de la pendiente longitudinal para diferentes caudales de entrada, q_1 (a) 155.5 l/s/m, (b) 198.0 l/s/m, y (c) 250.0 l/s/m.

Tabla 5.8. Porcentaje de caudal derivado.

Caudal de aproximación (m ³ /s/m)	Pendiente longitudinal de la reja (%)				
	10	20	30	33	35
0.1555	42	41	49	49	56
0.198	38	36	53	58	64
0.250	42	41	53	64	73

El porcentaje de caudal derivado presenta un valor casi constante para las pendientes del 10% y el 20% (de aproximadamente 40%) y una tendencia creciente para las pendientes longitudinales entre el 20% y el 35% para cada caudal de aproximación, con lo que se evidencia la influencia de la pendiente longitudinal en la capacidad de derivación de las rejillas con alto índice de huecos.

La configuración de las barras influye en la forma en la que las gravas se depositan cuando la pendiente cambia como se puede observar en la Figura 5.24 y en la Figura 5.25.

Figura 5.24. Vista superior de las rejillas ocluidas para $q_1 = 250$ l/s/m y (a) $tg\theta = 10\%$ y $L_m = 0.35$ m, (b) $tg\theta = 20\%$ y $L_m = 0.35$ m, (c) $tg\theta = 30\%$ y $L_m = 0.40$ m, y (d) $tg\theta = 35\%$ y $L_m = 0.45$ m.

Figura 5.25. Vista superior de las rejillas ocluidas para $q_1 = 0.1555$ m³/s/m y (a) $tg\theta = 10\%$ y $L_m = 0.25$ m, (b) $tg\theta = 20\%$ y $L_m = 0.25$ m, (c) $tg\theta = 30\%$ y $L_m = 0.30$ m, y (d) $tg\theta = 35\%$ y $L_m = 0.35$ m.

Comparando la cantidad de grava retenida en el caso de los caudales extremos ensayados —el más bajo (155.5 l/s/m) y el más alto (250.0 l/s/m)—, para las pendientes longitudinales más bajas, la cantidad de grava retenida es considerablemente mayor que para las pendientes más altas. También se puede observar que algunas de las gravas atrapadas entre las rejillas tienen un diámetro mayor que la separación entre barras, con lo que se verifica una vez más que las barras circulares se obstruyen con mayor facilidad y que el procedimiento de mantenimiento debería realizarse continuamente en caso de utilizarse.

5.3.1 CONSIDERACIONES SOBRE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GRAVAS EN LAS REJAS CON BARRAS CIRCULARES

Uno de los objetivos establecidos para realizar los ensayos con gravas en las rejillas con barras circulares e índices de huecos de 0.28 y 0.60, era generar la obstrucción en la rejilla

de forma que se pueda caracterizar el comportamiento de la reja cuando existe arrastre de sedimentos por parte del flujo. Para conseguir este objetivo, se utilizaron gravas cuyo diámetro medio sea aproximadamente igual al espaciamiento entre barras, que para el caso de la reja con $m = 0.28$ es $b_1 = 0.0117$ m, y para la reja con $m = 0.60$, $b_1 = 0.045$ m.

Para el caso de la reja con $m = 0.28$, los ensayos se realizaron utilizando la longitud total de la reja ($L = 0.90$ m), variando la pendiente longitudinal desde la horizontal hasta el 33%, y con un rango de caudales entre 0.1146 y 0.198 m³/s/m; mientras que para el caso de $m = 0.60$, la longitud de la reja tuvo que ajustarse a valores cercanos a la longitud máxima que alcanza el agua entre dos barras (L_1), debido a que al emplear la longitud total de la reja (0.90 m) se generaba un represamiento de gravas (Fotografía 5.3) que producía un incremento en el calado aguas arriba de la reja y la disminución de la velocidad de flujo con lo que se reducía también la capacidad de arrastre de material sólido, con lo cual se comprobó empíricamente la recomendación de Vargas (1998) sobre el incremento excesivo de la longitud de la reja que puede generar la acumulación de material sólido en el tramo en exceso dando lugar a la obstrucción total de la toma.

Otro de los cambios que se realizó en los ensayos con la reja $m = 0.60$ estuvo relacionado con la pendiente longitudinal de la reja y el caudal de aproximación. Al realizar ensayos con la pendiente horizontal, el calado aguas arriba de la reja aumentaba rápidamente, disminuyendo la capacidad de arrastre del flujo; por lo que se optó por realizar las pruebas adoptando pendientes longitudinales que variaban entre 10% y 35%. De igual manera, para garantizar que el flujo tenga capacidad para arrastrar las gravas con $d_{50} = 58$ mm; se utilizaron tres caudales específicos diferentes: 0.1555, 0.198 y 0.250 m³/s/m.

Como resultado de los ensayos en la reja con $m = 0.60$, se obtuvo la capacidad de captación de la reja y se pudo visualizar el efecto de oclusión en la reja. Sin embargo, no se pudo cuantificar el índice de huecos efectivo debido a que el tamaño de la grava seleccionada para el ensayo y la forma en que se depositaban sobre la reja creaba grandes espacios vacíos por los cuales se derivaba el caudal. Para futuras investigaciones de oclusión en rejas con altos índices de huecos, podría considerarse utilizar también gravas con menor tamaño a fin de producir un efecto de oclusión similar al alcanzado con la reja $m = 0.28$.

5.4 EFECTO DE OBSTRUCCIÓN EN REJAS CON BARRAS CIRCULARES Y BARRAS TIPO T

En la literatura técnica se encuentran recomendaciones sobre evitar el uso de barras circulares debido a que se obstruyen más fácilmente (Krochin, 1978; Orth et al., 1954); así como también, el caso contrario, en el que se asegura que los perfiles circulares o redondeados trabajan mejor en términos de capacidad de descarga y comportamiento ante la obstrucción (Andaroodi y Schleiss, 2006; Brunella et al., 2003).

En este apartado, se utilizan los resultados de estudios previos realizados con rejas de barras tipo T e índice de huecos, $m = 0.28$ (Castillo et al., 2016; García, 2016), y los resultados obtenidos durante esta campaña experimental con rejas de barras circulares y $m = 0.28$; a fin de comparar su comportamiento ante flujo con arrastre de material sólido. Se han escogido estas configuraciones de reja debido a la similitud de condiciones en las que se realizaron los ensayos con gravas.

El análisis se realiza considerando la capacidad de captación de las diferentes configuraciones de reja y el efecto que produce la oclusión en la determinación de la longitud de reja necesaria para captar un caudal determinado estimando un factor de oclusión a partir del porcentaje de obstrucción en la reja.

5.4.1 CAPACIDAD DE DERIVACIÓN

Como se menciona en el apartado 1.2.7, García (2016) —información empleada también en Castillo et al. (2016)—, realizó ensayos utilizando rejas con barras tipo T:

- Con índice de huecos $m = 0.22$ y gravas con $d_{50} = 8.30$ mm y caras redondeadas (denominada grava 1).
- Con índice de huecos $m = 0.28$; y dos tipos diferentes de gravas: $d_{50} = 14.80$ mm y caras de fractura (grava 2); y $d_{50} = 22.00$ mm y caras redondeadas (grava 3)

Con los resultados de estos ensayos y empleando gráficas de la capacidad de captación — $(q_1 - q_2)/q_1$ — en función de la pendiente longitudinal de la reja; se llegó a determinar que con la pendiente del 30% se obtiene la mayor eficiencia de captación en este tipo de rejas.

Considerando la información disponible de García (2016), se reprodujeron las gráficas de capacidad de captación para los casos ensayados con rejas con barras tipo T y $m = 0.28$; y se las compararon con las gráficas obtenidas para rejas con barras circulares de la Figura 5.4, dando lugar a la Figura 5.26. En esta figura se puede observar que las mayores eficiencias se encuentran en las rejas con barras tipo T.

Figura 5.26. Comparación de caudal derivado con rejillas de barras tipo T (grava 2 y 3) y barras circulares (grava 3) para $q_1 =$: (a) 114.6 l/s/m, (b) 138.3 l/s/m, y (c) 155.5 l/s/m (García et al., 2018b).

Si se analizan algunos de los factores que intervienen en el fenómeno de flujo con arrastre de sedimentos sobre una rejilla de captación de fondo, se encuentra que:

- Los índices de huecos efectivos calculados para los casos de rejilla con barras tipo T presentan valores más elevados que los obtenidos para la rejilla con barras circulares; y esta última no tiene una variación significativa de m' con el incremento de caudal como se puede observar en la Figura 5.27.

Figura 5.27. Comparación de m' en función del caudal derivado para rejillas con barras tipo T (grava 2 y 3) y barras circulares (grava 3) para una pendiente longitudinal del 33% (García et al., 2018b).

- La cantidad de material depositado sobre la reja es mayor en el caso de rejas con barras circulares, lo que corresponde a un índice de huecos efectivo menor, como se muestra en la Figura 5.28.

Figura 5.28. Comparación entre el porcentaje de material depositado en función de la pendiente longitudinal para rejas con barras tipo T y barras circulares con $q_1 = 138.3 \text{ l/s/m}$ (García et al., 2018b).

Con estos resultados, se confirman las afirmaciones de Krochin (1978) —“no se aconsejan las barras redondas pues se obstruyen más rápidamente con arena y piedra fina y son más difíciles de limpiar”— y de Orth (1954) —“cualquier perfil cuya parte superior esté redondeada facilita el enganche de gravas entre las barras de la reja”—; puesto que las rejas con barras circulares presentan un menor capacidad de captación con respecto a las barras tipo T (planas); así como un mayor porcentaje de material depositado entre las barras con la consiguiente disminución de índice de huecos (índices de huecos efectivos más bajos que aquellos calculados para las rejas con barras tipo T).

5.4.2 FACTOR DE OBSTRUCCIÓN

Como se mencionó anteriormente en este capítulo, la presencia de arrastre de sedimentos en el flujo genera obstrucción entre los espacios de las barras y da lugar a la definición del índice de huecos efectivo (m') que considera esta reducción del área de vacíos.

Si se utiliza m' en lugar del índice de huecos inicial (m) en la ecuación (4.16), se podría calcular el valor de la longitud necesaria de reja para derivar el caudal de diseño considerando el efecto de la oclusión en la reja:

$$L_f = \frac{q}{\overline{C_{qH}} m' \sqrt{2gH_{min}}} \quad (5.1)$$

Donde $\overline{C_{qH}}$ corresponde al coeficiente de descarga promedio obtenido en condiciones de agua clara; y L_f es la longitud de reja necesaria para derivar el caudal de diseño considerando oclusión.

A fin de tener una relación entre la longitud de reja necesaria para derivar el mismo caudal de diseño considerando agua clara y el efecto de la oclusión, se divide la ecuación (5.1) para la ecuación (4.16):

$$\frac{L_f}{L} = \frac{m}{m'} = f \quad (5.2)$$

Donde f es el factor de obstrucción que introduce el efecto de oclusión por arrastre de material sólido del río en la longitud de reja calculada en condiciones de agua clara.

$$L_f = f \frac{q}{C_{qH} m \sqrt{2gH_{min}}} \quad (5.3)$$

Para obtener el factor de obstrucción, f , se considera la información de García (2016) sobre los ensayos que realizó empleando gravas en las rejas con barras tipo T; así como la información recopilada en laboratorio de los ensayos con gravas en las rejas circulares que forman parte de este capítulo.

Para el caso de las rejas con barras circulares —índice de huecos $m = 0.28$ —, se obtuvieron los factores de obstrucción a partir de los valores de m' calculados utilizando el método Runge Kutta de cuarto orden, para todos los ensayos realizados y se los graficaron en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ —siendo q_1 el caudal de aproximación, m el índice de huecos inicial y $tg\theta$ la pendiente longitudinal de la reja— como se muestra en la Figura 5.29.

Figura 5.29 Gráfico de los factores de obstrucción de la reja circular $m = 0.28$ en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$.

En la Figura 5.29 se observa que el factor de obstrucción para la reja con barras circulares varía entre 2.90 y 4.10 y presenta variaciones en función de la pendiente longitudinal de la reja y del caudal de aproximación; por ejemplo, para el caso de la pendiente 10%, f varía entre 3.50 y 4.00; mientras que para la pendiente 35%, f varía entre 3.00 y 3.70.

Los valores más bajos de factor de obstrucción se presentan con las pendientes y los caudales de aproximación más altos. También se observa que, en el caso de la pendiente horizontal, el factor de obstrucción no presenta la misma tendencia que tienen las demás puesto que el factor de obstrucción tiende a una línea horizontal alrededor de $f = 3.93$.

Para el caso de las rejillas con barras tipo T, primero se realizaron los cálculos del índice de huecos efectivo utilizando la información disponible de las mediciones realizadas por García (2016) —caudal de aproximación, caudal rechazado, calado al inicio de la rejilla para agua clara— para las rejillas con índices de huecos $m = 0.22$ y 0.28 . Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 5.2.1, se aplicó el algoritmo Runge Kutta de cuarto orden a las ecuaciones (1.75) y (1.98) para determinar los valores de m' —ensayo y error— para todos los datos disponibles (15 valores para $m = 0.22$ y 30 valores para $m = 0.28$).

$$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75\left(\frac{x}{h_c}m'\right)}}{(1 + 0.90tg\theta)} \quad (1.75)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2m'C_{qH}\sqrt{(H_0 + xsen\theta)(H_{00} + xsen\theta - hcos\theta)} + hsen\theta}{3hcos\theta - 2(H_0 + xsen\theta)} \quad (1.98)$$

Con los valores de m' calculados, se obtuvieron los factores de obstrucción para las rejillas con barras tipo T y se las graficó en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ de acuerdo a la pendiente longitudinal de la rejilla, el índice de huecos original de la rejilla y el tipo de grava utilizado como se puede observar en la Figura 5.30.

En esta figura se puede observar que para valores bajos del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ se presentan los factores de obstrucción más altos mientras que para valores altos de $q_1(1+tg\theta)m$, el factor de obstrucción tiende a converger alrededor de un valor específico que varía de acuerdo con la pendiente longitudinal de la rejilla y del que se volverá a tratar en el capítulo siguiente.

En conclusión, se puede observar que a través de la determinación del factor de obstrucción también se establece que las rejillas con barras tipo T presentan mejores características para el diseño de captaciones considerando oclusión puesto que el rango de variación de f calculado se encuentra entre 1.20 y 3.00; mientras que, en el caso de la rejilla con barras circulares, este valor fluctúa entre 2.90 y 4.10.

Figura 5.30. Gráfico de los factores de obstrucción de la reja tipo T en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ para las pendientes: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, y (e) 33%.

CAPITULO 6

CRITERIOS Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CAPTACIONES CON REJAS DE FONDO

6.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del desarrollo de los capítulos anteriores se han presentado varios criterios y recomendaciones realizadas por diferentes autores para que sean considerados al momento de realizar el diseño de una captación con reja de fondo. Algunos criterios se complementan entre sí; mientras que otras recomendaciones se contradicen.

En este capítulo se pretende resumir las aportaciones encontradas en la literatura técnica, así como presentar algunas recomendaciones producto del desarrollo de la presente tesis.

6.2 ANTES DE REALIZAR EL DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN DE FONDO

Antes de iniciar el proceso de diseño de una reja para captación de fondo es importante considerar los siguientes aspectos:

- Conocer el lugar en el que se va a implantar la estructura de captación.
- Tomar en cuenta los usos consuntivos (agua potable, riego, generación hidroeléctrica) y no consuntivos (caudal ecológico) del caudal disponible en el río.
- Ubicar la captación en un tramo de río donde se pueda garantizar el ingreso del caudal de diseño (Fernández-Jáuregui et al., 1991).
- Investigar la existencia de estudios de caudales sólidos en la zona de implantación de la reja o en tramos cercanos a ella.
- Considerar el diseño de un azud a una altura conveniente sobre el que se pueda colocar la reja de fondo (Krochin, 1978; Drobir, 1981); y disponer de un cuenco de retención de sedimentos aguas arriba de la reja para contener los sedimentos de gran tamaño y reducir la velocidad de aproximación del flujo (Simmler, 1978).
- La altura del tramo restante de azud de cierre debe ser mayor a la altura de la reja, con lo que el agua circulará sobre la reja, aún para los caudales mínimos (Castro, 2005).
- Definir los parámetros iniciales de diseño de la reja de tal manera que se cumplan con los siguientes objetivos fundamentales (Krochin, 1978):
 - ❖ Captar la mayor cantidad de agua posible,

- ❖ Derivar el mínimo de materiales sólidos a fin de que no se produzca la obstrucción de la reja,
- ❖ Garantizar que las labores de operación y mantenimiento sean las mínimas posibles, y
- ❖ Generar los menores impactos ambientales.

6.3 CONSIDERACIONES PARA REALIZAR EL DISEÑO DE UNA CAPTACIÓN DE FONDO

Para iniciar el diseño de una captación de fondo, es importante analizar algunos factores que influyen en el comportamiento de la reja como:

6.3.1 TIPO DE BARRA

En el momento de decidir el tipo de reja que se diseñará es importante considerar el uso que se dará a la captación (proyectos de dotación de agua potable, riego o generación hidroeléctrica) y las características del cauce en el que se implantará la obra en cuanto a cantidad de arrastre de material sólido.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el perfil de las barras que conforman la reja influye en su capacidad de captación de acuerdo con las condiciones en que serán utilizadas. En la Figura 6.1 se puede observar diferentes recomendaciones de perfil de barra para el caso de captaciones en agua clara y considerando transporte de sedimentos.

Figura 6.1 Tipos de barra recomendados para captaciones con reja de fondo para agua clara y para flujo con transporte de sedimentos.

Como se observa en la figura, cuando se trata de captación en agua clara los perfiles hidrodinámicos presentan un funcionamiento óptimo; en cambio, al considerar flujos con transporte de sedimentos, los perfiles con superficie plana (como las barras tipo T) presentan mejor comportamiento —como se determinó en el apartado 5.4.1.

6.3.2 PENDIENTE LONGITUDINAL DE LA REJA

Cuando se trata de captaciones en agua clara, la cantidad de caudal derivado disminuye mientras aumenta la pendiente; en cambio, en flujo con arrastre de sedimentos ocurre el efecto contrario: la cantidad de caudal derivado aumenta con el incremento de la pendiente (García 2016).

Al respecto, las recomendaciones que se encuentran en la literatura sobre la pendiente longitudinal de la reja refieren en primer lugar el valor del 20% aunque también sugieren que puede variar en un rango de 5° (8.7%) y 35° (70%) e incluso alcanzar los 40° (84%) por problemas de oclusión (Bouvard, 1992; Krochin, 1978; Raudkivi, 1993).

De acuerdo con los estudios realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT, el valor de pendiente longitudinal óptima —considerando arrastre de sedimentos— para las barras tipo T se encuentra en el 30%; mientras que, en el caso de las rejas con barras circulares, la eficiencia en la captación se incrementa con la pendiente, aunque no llega a superar la capacidad de derivación de las rejas con barras tipo T.

6.3.3 ESPACIAMIENTO ENTRE BARRAS DE LA REJA

Al igual que en el caso del tipo de barra que se utilizará en la reja, el espaciamiento que se colocará entre las barras de las rejas también depende del uso que se dará a la captación y de la capacidad de arrastre del cauce donde se implementará la estructura de captación.

En cuanto al uso que se dará a la captación, en la literatura técnica, se encuentran recomendaciones como las que se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Resumen de valores de espaciamiento entre barras recomendados en la literatura técnica.

Autor	Uso	Espaciamiento
(Andaroodi y Schleiss, 2006)	Generación de electricidad (pequeñas centrales hidroeléctricas)	0.02 a 0.04 m
(Raudkivi, 1993)		0.005 m mínimo
(Bouvard, 1992)	Generación de electricidad (turbinas o sifones)	0.02 – 0.03 m
(Bouvard, 1992)	Otros usos	0.10 – 0.12 m
(Castro, 1986)	Si el flujo va hacia un reservorio	0.10 m o más
(Castro, 1986)	Generación de electricidad	0.02 m o menos
(Drobir, 1981)		0.15 m
(Krochin, 1978)	Generación de electricidad	0.02 – 0.06 m
(Ract-Madoux et al., 1955)		0.10 m

Cuando se considera el transporte de sedimentos del cauce, es importante recordar uno de los aportes de Orth et al., (1954): “un sólido de tamaño cercano al espacio entre dos barras inevitablemente se atasca entre ellas, independientemente del perfil que se utiliza”.

6.3.4 COEFICIENTE DE DESCARGA PROMEDIO

Como se explica en el apartado 4.4, el coeficiente de descarga promedio de la reja puede obtenerse empleando la ecuación (4.11):

$$\overline{C_{qH}} = \frac{amC_{q0}}{(1 + tg\theta)} q^b \quad (4.11)$$

Donde C_{q0} es el coeficiente de descarga estático propuesto por García (2016) y los parámetros a y b son constantes que dependen del índice de huecos de la reja (García et al., 2018a).

El coeficiente de descarga estático puede estimarse empleando la ecuación (4.12):

$$C_{q0} = we^{-0.771m} \quad (4.12)$$

Donde el parámetro w depende del tipo de barra de la reja: 0.901 para barras tipo T, 1.4287 para barras circulares y 1.52 para barras cuerpo de pez —como se menciona en el apartado 4.4.1—.

En cuanto a los parámetros a y b , se consideran los valores obtenidos con barras tipo T y circulares (García et al., 2018a); y los valores calculados para barras cuerpo de pez —que se mencionan en el apartado 4.4—.

Para el caso del parámetro a , desde un punto de vista ingenieril, se propone un ajuste de tipo potencial como se presenta en la Figura 6.2.

$$a = 0.37m^{-1.151} \quad (6.1)$$

Figura 6.2 Gráfico del parámetro a en función de m para rejas con barras tipo T (+), circulares (O) y cuerpo de pez (Δ).

Para determinar el parámetro b , se realizó una gráfica donde se representan los valores obtenidos para barras tipo T, circulares y cuerpo de pez en función del índice de huecos como se muestra en la Figura 6.3; donde, además, se pueden observar cuatro secciones características que permiten proponer un ajuste lineal como el que se presenta en la ecuación (6.2).

Figura 6.3 Gráfico del parámetro b en función de m para rejillas con barras tipo T (+), circulares (O) y cuerpo de pez (Δ).

$$\begin{aligned}
 m \leq 0.28 & \quad b = 0.05 \\
 0.28 < m \leq 0.313 & \quad b = 2.195 m - 0.5646 \\
 0.313 < m < 0.60 & \quad b = 0.270 m + 0.0378 \\
 m \geq 0.60 & \quad b = 0.20
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Con estas expresiones, se pueden realizar gráficas donde se pueda visualizar la variación del coeficiente de descarga promedio y de la longitud de reja necesaria para derivar un caudal, considerando diferentes pendientes longitudinales de reja en función del caudal específico de captación para diferentes tipos de barra como se puede observar en la Figura 6.4, en la Figura 6.5 y en la Figura 6.6.

En estas figuras se puede observar que el valor del coeficiente de descarga disminuye con el incremento de la pendiente mientras que los valores de longitud se incrementan con la pendiente; este comportamiento presenta concordancia con los resultados de la campaña experimental descrita en el Capítulo 3.

También se observa los coeficientes de descarga promedio con valores más altos se presentan en las rejillas con barras de perfil más hidrodinámico, condición que también se verifica al comparar los resultados de este trabajo con aquellos que se encuentran en la literatura técnica.

Figura 6.4 Parámetros de diseño en función del caudal específico de captación y la pendiente longitudinal para una reja con barras tipo T y $m = 0.16$. (a) C_{qH} , y (b) Longitud de reja.

Figura 6.5 Parámetros de diseño en función del caudal específico de captación y la pendiente longitudinal para una reja con barras cuerpo de pez y $m = 0.30$ (a) C_{qH} , y (b) Longitud de reja.

Figura 6.6 Parámetros de diseño en función del caudal específico de captación y la pendiente longitudinal para una reja con barras circulares y $m = 0.63$. (a) C_{qH} , y (b) Longitud de reja.

A partir de gráficas como la Figura 6.4 a la Figura 6.6, se pueden construir ábacos de diseño, incluyendo el factor $(1+\text{tg}\theta)$ que introduce la influencia de la pendiente longitudinal de la reja en el cálculo del coeficiente de descarga promedio (Figura 6.7, Figura 6.8 y Figura 6.9) y de la longitud de reja para agua clara (Figura 6.10, Figura 6.11 y Figura 6.12), considerando diferentes valores de índices de huecos.

Figura 6.7 Ábaco de $C_{qH}(1+\text{tg}\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras tipo T.

Figura 6.8 Ábaco de $C_{qH}(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras circulares.

Figura 6.9 Ábaco de $C_{qH}(1+tg\theta)$ en función de q para rejas con barras cuerpo de pez.

Figura 6.10 Ábaco de $L/(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejas con barras tipo T.

Figura 6.11 Ábaco de $L/(1+tg\theta)$ en función del caudal de diseño para rejillas con barras circulares.

Figura 6.12 Ábaco de $L/(1+tg\theta)$ en función de q para rejillas con barras cuerpo de pez.

6.3.5 FACTOR DE OBSTRUCCIÓN

Al momento de diseñar rejillas para captaciones de fondo en flujo con transporte de sedimentos, es importante considerar adecuadamente el factor de obstrucción, f , que es aquel que multiplica el valor de la longitud de reja calculada para agua clara, a fin de obtener la longitud de reja que permitirá derivar el caudal de diseño, considerando el efecto de la oclusión. Como se mencionó en el apartado 5.4.2, para estimar el valor del factor de obstrucción se utiliza la ecuación (5.2):

$$\frac{L_f}{L} = \frac{m}{m'} = f \quad (5.2)$$

Como se mencionó en los apartados 1.2.7.11 y 1.2.7.12 del Capítulo 1 y en el Capítulo 5 de la presente tesis, para analizar el efecto del arrastre de material sólido en la reja de una captación de fondo, en la Universidad Politécnica de Cartagena se han desarrollado más de 300 ensayos utilizando rejas con barras tipo T y con barras circulares. Uno de los resultados obtenidos a través del análisis de estos ensayos, se presentaron en la Figura 5.29 y Figura 5.30 del apartado 5.4.2, donde se observa la variación de f en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$. Los ensayos realizados con gravas presentan dispersión en el factor de oclusión; sin embargo, este fenómeno no se considera como un error si no como una desviación en los resultados debido a la naturaleza estocástica del fenómeno del transporte de sedimentos. Por ejemplo, para los ensayos realizados con caudales de aproximación y pendientes longitudinales de reja bajos, el factor de oclusión puede aumentar considerablemente.

Figura 6.13 Factores de obstrucción de la reja con barras tipo T en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ para las pendientes: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, y (e) 33%.

Para el caso de las rejillas con barras tipo T, —índices de huecos $m = 0.22$ y 0.28 —, se obtuvieron factores de obstrucción con un rango de variación entre 1.20 y 3.00, considerando pendientes longitudinales de rejilla entre 0% y 33%. El valor medio de factor de oclusión se presenta en la Tabla 6.2 y en la Figura 6.13 con líneas entrecortadas. Este factor medio se calculó omitiendo el valor más alto de f de cada figura, considerando que penalizaría excesivamente el diseño.

Tabla 6.2 Resumen de los valores de f propuestos para cada pendiente longitudinal de la rejilla.

$tg\theta$	0%	10%	20%	30%	33%
f	1.65	1.50	1.40	1.35	1.37

Si bien, en la Tabla 6.2, se presentan valores variables para el factor de obstrucción que debería considerarse en el caso de rejillas con barras tipo T; se propone utilizar un valor constante de $f = 1.40$ tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- El valor de pendiente óptima para utilizar en presencia de sedimentos, determinada por García (2016) corresponde al 30%.
- En la literatura técnica (Bouvard, 1992; Drobir, 1981; Krochin, 1978; Raudkivi, 1993), cuando se realizan recomendaciones sobre el diseño de rejillas para captación de fondo considerando la presencia de sedimentos, se mencionan pendientes mayores al 20%.

La propuesta de $f = 1.40$ se enmarca en los criterios de diseño emitidos por otros investigadores sobre el incremento en la longitud de rejilla cuando existe riesgo de oclusión que debe variar entre el 20% y el 100% (Andaroodi y Schleiss, 2006; Bouvard, 1992; Drobir, 1981; Jiménez y Vargas, 2006; Lauterjung y Schmidt, 1989).

Para el caso de las rejillas con barras circulares —índice de huecos $m = 0.28$ —, se obtuvieron los factores de obstrucción en un rango de 2.90 y 4.10, considerando pendientes longitudinales de rejilla entre 0% y 35%. Si se agrupan estos valores, estableciendo como parámetro de clasificación a las pendientes longitudinales de la rejilla mayores (e iguales) al 20% —pendientes menores no son recomendables para implementación de captaciones de fondo con considerable arrastre de sedimentos (Andaroodi y Schleiss, 2006; Bouvard, 1992; Drobir, 1981; García, 2016; Raudkivi, 1993)—, se obtiene la Tabla 6.3:

Tabla 6.3 Resumen de valores promedio y máximos de f .

$tg\theta$	20%	30%	33%	35%
f_{prom}	3.61	3.47	3.45	3.39
f_{max}	4.04	3.85	3.86	3.66

Figura 6.14 Factores de obstrucción de la reja con barras circulares y $m = 0.28$ en función del parámetro $q_1(1+tg\theta)m$ y propuesta del valor promedio de f (.....).

Los valores de f promedio varían alrededor de 3.50, por lo que —como recomendación por parte de la presente tesis de cara a servir de ayuda al diseño—, se propone utilizar este valor (Figura 6.14), constante, como factor de obstrucción de las rejillas con barras circulares, considerando, además, que este tipo de rejillas no son adecuadas cuando existe riesgo de oclusión (Andaroodi y Schleiss, 2006; García et al., 2018b; Krochin, 1978) porque se obstruyen con mayor facilidad.

La consideración de estas recomendaciones y criterios de diseño se utilizan en la estructuración del programa de cálculo que se presenta en el capítulo siguiente.

CAPITULO 7

PROGRAMA DE DIMENSIONAMIENTO DE REJAS PARA CAPTACIONES DE FONDO UTILIZANDO EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN MATLAB® R2018b

7.1 INTRODUCCIÓN

Para desarrollar el programa de dimensionamiento de la reja de los sistemas de captación de fondo, se utilizó la plataforma de MATLAB® R2018b.

MATLAB® es la abreviatura de *Matrix Laboratory* y se trata de un entorno optimizado para resolver problemas de ingeniería utilizando un lenguaje basado en matrices («MathWorks», 2019). Entre sus características principales se encuentran:

- Entorno de escritorio que permite la exploración iterativa
- Gráficas para visualizar datos
- Herramientas para crear diagramas y ajustar curvas
- Herramientas para crear aplicaciones (app) con interfaces de usuario personalizadas

Una aplicación es un programa autónomo de MATLAB que provee una interfaz gráfica a un código de programación. MATLAB presenta tres opciones para desarrollar aplicaciones, sin embargo, en este apartado se mencionan únicamente la opción utilizada:

- **GUIDE** es un entorno de arrastrar y soltar (drag-and-drop) que cuenta con componentes interactivos como: menús, barras de herramientas y tablas (Figura 7.1).

Figura 7.1 Vista del entorno de diseño de la interfaz gráfica utilizando GUIDE.

El comportamiento de la interfaz se codifica en el editor de MATLAB y puede mostrar todos los tipos de gráficas disponibles en MATLAB («MathWorks», 2019).

7.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

En el capítulo anterior se describieron las recomendaciones obtenidas de la literatura técnica; así como los criterios producto de las investigaciones en laboratorio que han realizado en la UPCT y que se han considerado para el planteamiento de la metodología de diseño de la reja para una captación de fondo, en los siguientes aspectos:

- Tipo de barras para la reja
- Pendiente longitudinal de la reja
- Espaciamiento entre barras de la reja
- Determinación del coeficiente de descarga promedio
- Determinación del factor de obstrucción de la reja.

7.2.1 INFORMACIÓN DEL PROYECTO Y DE LA REJA

Para realizar el dimensionamiento de la reja se utilizan los parámetros que se detallan en la Tabla 7.1 y en la Figura 7.2.

Figura 7.2 Esquema de los elementos que se consideran para realizar el diseño de una reja para captación de fondo.

Tabla 7.1 Información para realizar el dimensionamiento de la reja.

Parámetro	Simbología	Unidad	Observación
Ancho del río en el tramo de captación	B_r	(m)	Condiciones de diseño
Caudal de diseño	Q_d	(m ³ /s)	
Caudal de máxima crecida	Q_{max}	(m ³ /s)	Valor referencial. No influye en el diseño de la reja
Ancho de la reja	B	(m)	Se asume un valor para iniciar el cálculo, y debe corresponder a criterios técnicos y económicos.

Parámetro	Simbología	Unidad	Observación
Pendiente longitudinal de la reja	$tg\theta$	(%)	Se eligen en función del uso de la captación y las condiciones de diseño (apartado 6.3)
Espaciamiento entre barras	b_1	(m)	
Ancho de la barra	b_w	(m)	
Índice de huecos	m	(-)	Relación entre el área de espacios vacíos y el área total de la reja
Longitud de reja para captación	$L - L_f$	(m)	Representan la máxima longitud que alcanza el flujo sobre la barra de la reja (Drobir et al, 1999). L se utiliza en el diseño con agua clara , y L_f , cuando se considera transporte de sedimentos
Máxima longitud que alcanza el flujo entre dos barras consecutivas (Drobir et al., 1999)	L_1	(m)	El valor de L_1 se utiliza en el gráfico del perfil de flujo.

7.2.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y LONGITUD DE LA REJA

El cálculo de los diferentes parámetros hidráulicos utiliza las expresiones que se detallan a continuación:

7.2.2.1 Caudal específico

Para estimar el caudal específico, q , se considera la siguiente expresión:

$$q = \frac{Q_d}{B} \quad (7.1)$$

7.2.2.2 Calado crítico y Energía específica mínima

Para estimar el calado crítico, h_c y la energía específica mínima, H_{min} , se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (7.2)$$

$$H_{min} = \frac{3}{2} h_c \quad (7.3)$$

Donde g es el valor de la aceleración de la gravedad que se considera 9.81 m/s².

7.2.2.3 Índice de huecos

El índice de huecos, m , representa la relación entre el espacio entre barras (b_1) y la longitud del interreje (b_1+b_w) y se calcula con:

$$m = \frac{b_1}{b_1 + b_w} \quad (7.4)$$

7.2.2.4 Coeficiente de descarga promedio

Para estimar el coeficiente de descarga promedio de la reja se utiliza la ecuación (7.5):

$$\overline{C_{qH}} = \frac{a m C_{q0}}{(1 + t g \theta)} q^b \quad (7.5)$$

Donde: C_{q0} es el coeficiente de descarga estático que depende del tipo de barra que conforma la reja y los parámetros a y b dependen del índice de huecos.

El coeficiente de descarga estático se calcula utilizando la ecuación (7.6):

$$C_{q0} = w e^{-0.771m} \quad (7.6)$$

Donde w es un parámetro que toma el valor de 0.901 para barras tipo T, 1.4287 para barras circulares y 1.52 para barras cuerpo de pez.

Los parámetros a y b se obtienen aplicando las ecuaciones (7.7) y (7.8).

$$a = 0.37 m^{-1.151} \quad (7.7)$$

$m \leq 0.28$	$b = 0.05$	
$0.28 < m \leq 0.313$	$b = 2.195 m - 0.5646$	
$0.313 < m < 0.60$	$b = 0.270 m + 0.0378$	(7.8)
$m \geq 0.60$	$b = 0.20$	

7.2.2.5 Longitud de la reja mojada para captación de agua clara

La longitud mínima de reja necesaria para derivar un determinado caudal de agua clara, L , se calcula empleando la ecuación (7.9):

$$L = \frac{q}{\overline{C_{qH}} m \sqrt{2gH_{min}}} \quad (7.9)$$

7.2.2.6 Longitud de la reja mojada para captación considerando transporte de sedimentos

Para obtener la longitud de reja necesaria para derivar un determinado caudal considerando transporte de sedimentos, L_f , se debe determinar —en primer lugar— el factor de obstrucción. Este parámetro depende del tipo de barras de la reja —tipo T o circulares— según se explica en el apartado 6.3.5 y que se resumen en la Tabla 7.2.

Una vez definido el valor de f se calcula el valor de L_f con ayuda de la ecuación (7.10):

$$L_f = fL \quad (7.10)$$

En el capítulo anterior también se mencionó que las rejillas con barras circulares no son recomendables para utilizarse en captaciones de flujo con abundante transporte de sedimentos porque tienen a taponarse con mayor facilidad; sin embargo, se las considera en el planteamiento del programa a fin de que el usuario pueda realizar comparaciones.

Tabla 7.2 Valores del coeficiente f para los tipos de barra considerados en el programa.

Tipo de Barra	Forma	f
Tipo T		1.40
Circular		3.50

7.2.2.7 Gráficas del perfil de flujo y caudal captado a lo largo de la rejilla

Como se ha mencionado anteriormente, Drobir et al. (1999), identificaron dos longitudes de flujo características sobre una rejilla de captación de fondo, denominadas L_1 y L_2 . L_1 representa la máxima longitud que alcanza el flujo entre dos barras consecutivas, y L_2 es la longitud máxima que alcanza el flujo sobre la barra y es la que se considera como la longitud de diseño — L o L_f , según corresponda a diseño en agua clara o considerando sedimentos—; como se puede observar en la Figura 7.3.

Figura 7.3 Esquema de las longitudes L_1 y L , propuestas por Drobir et al. (1999).

Para representar gráficamente el perfil de flujo sobre una rejilla de captación de fondo, se aplica el algoritmo Runge-Kutta de cuarto orden para incrementos de longitud, Δx , de 0.005 m a la ecuación (1.71)—que representa la variación de la lámina de flujo a lo largo de la rejilla—, hasta que el valor del calado de agua que conforma el perfil de flujo adquiera valores cercanos a cero (en positivo). El valor inicial de calado, h_0 , se considera igual al 90% del calado crítico para el caso de rejillas con barras circulares e igual al 70% del calado crítico para rejillas con barras tipo T.

El último valor de x empleado en el cálculo representa el valor de L_1 , que es menor a la longitud de diseño.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}(x)\sqrt{(H_{min} + x\sin\theta)(H_{min} + x\sin\theta - h\cos\theta)} + h\sin\theta}{3h\cos\theta - 2(H_{min} + x\sin\theta)} \quad (1.71)$$

Donde $C_{qH}(x)$ representa el coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja que se calcula con la ecuación (7.11).

Para barras tipo T:

$$C_{qH}(x) \approx \frac{0.58e^{-0.75\left(\frac{x}{h_c}m\right)}}{(1 + 0.90tg\theta)}$$

Para barras circulares:

$m < 0.40$:

$$C_{qH}(x) \approx \frac{1 - 0.15 \left[1 - 0.51(1 - 0.45tg\theta) \left(\frac{x}{h_c}m \right) \right]^{-2.7}}{1 + tg\theta}$$

$0.40 < m < 0.59$ (7.11)

$$C_{qH}(x) \approx 1.558\overline{C_{qH}}$$

$m > 0.59$:

$$C_{qH} \approx \frac{1 + 0.2tg\theta}{1 + tg\theta} \left[0.145 \left(\frac{x}{h_c}m \right) + 0.50 \right]$$

$(x/h_c)m < 0.96$

$(x/h_c)m > 0.96$

$$C_{qH} \approx \frac{1 + 0.2tg\theta}{1 + tg\theta} \left[0.4856 \left(\frac{x}{h_c}m \right)^{-6.021} \right]$$

Para considerar la ubicación del perfil de flujo con respecto a la inclinación de la reja que se define con el par de coordenadas: $r_{(0)} = (0,0)$ y $r_{(1)} = (x_{L1}, x_{L1} tg\theta)$, se debe ajustar los valores de calado calculado con el algoritmo de Runge Kutta de cuarto orden en cada tramo, aplicando las ecuaciones (7.12) y (7.13):

$$x_{perfil(i)} = x_{(i)} \quad (7.12)$$

$$h_{perfil(i)} = h_{(i)} - x_{perfil(i)} tg\theta \quad (7.13)$$

Para obtener la gráfica de caudal derivado en función de la longitud de la reja, se utiliza la ecuación (7.14) para cada tramo de 0.005 m de reja que se acumula a lo largo de la reja empleando la ecuación (7.15).

$$q(x) = C_{qH}(x)m\Delta x\sqrt{2g(H_{min} + x\sin\theta)} \quad (7.14)$$

$$q_{acum}(x + 1) = q(x) + q_{acum}(x) \quad (7.15)$$

Para realizar las gráficas del perfil de flujo y del caudal derivado a lo largo de la reja considerando el posible efecto de la oclusión, es necesario calcular el índice de huecos efectivo de la reja con ayuda de la ecuación (7.16):

$$m' = \frac{m}{f} \quad (7.16)$$

Este valor que considera el efecto de la obstrucción en la reja debe reemplazar el valor del índice de huecos original, m , en donde corresponda de las ecuaciones (1.71), (7.11) y (7.14) para repetir el procedimiento ya descrito para el caso de agua clara.

Cabe mencionar que, no se considera la barra cuerpo de pez para realizar este tipo de gráficas debido a que no se cuenta con información de laboratorio que permita determinar el coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja.

7.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Para diseñar la interfaz gráfica del programa de cálculo, se consideraron las siguientes secciones:

- Presentación del programa
- Información del Proyecto
- Información de la Reja
- Cálculo de Parámetros Hidráulicos
- Presentación de gráficos (perfil de flujo sobre la reja, caudal derivado, comparativa de longitud de reja para los tipos de barras estudiados)
- Tabla comparativa de las dimensiones de la reja cuando varía el ancho de captación (B).
- Opciones de ejecución del programa

En los siguientes apartados, se describe la configuración de cada sección.

7.3.1 PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA

La herramienta GUIDE permite crear pantallas introductorias donde se pueden colocar explicaciones breves de las características del programa o presentar alternativas al usuario (Barragán, 2017).

En este caso, la pantalla introductoria presenta los escudos de las dos universidades vinculadas en este estudio —Universidad Politécnica de Cartagena y Escuela Politécnica Nacional—, un menú desplegable que permite seleccionar el idioma en el que puede utilizarse el programa, el título del programa; el botón “Acerca de”, que describe brevemente las bases de diseño empleadas; el botón “Manual de Usuario” que presenta instrucciones de utilización del programa, y botones que ofrecen al usuario las alternativas de diseño para rejillas de fondo; salir del programa y cambiar el idioma.

La configuración del diseño de la interfaz se muestra en la Figura 7.4; mientras que en la Figura 7.5 se puede observar la vista de la pantalla de presentación cuando se ejecuta el programa.

Figura 7.4 Diseño de la Interfaz de presentación del programa en GUIDE.

Figura 7.5 Presentación de la pantalla introductoria cuando se ejecuta el programa en español.

7.3.2 INTERFAZ PARA DISEÑO EN AGUA CLARA

Para realizar el diseño de la interfaz gráfica de diseño en agua clara se consideraron los siguientes elementos:

- Cálculo de la longitud de la reja, dado un valor de ancho de captación (B).
- Visualización del perfil de flujo y caudal derivado.
- Comparación de la longitud de reja, considerando diferentes tipos de barras y diferentes anchos de captación.

En la Figura 7.6 y en la Figura 7.7 se puede observar la propuesta general de la interfaz, con sus elementos que serán detallados a continuación.

Información del Proyecto

corte_esquema

planta_esquema

Ancho del río en la zona de captación $Br =$ m

Caudal de diseño $Qd =$ m³/s

Caudal de máxima crecida $Qmax =$ m³/s

Calcular

Figuras

Comparar

Manual Técnico

Variar parámetros

Nuevo cálculo

Menú

Salir

Información de la Reja

Ancho de la reja $B =$ m

Pendiente longitudinal de la reja $tg \theta =$ %

Tipo de barra

Espaciamiento entre barras $b1 =$ m

Ancho de la barra $bw =$ m

Tipo_reja_axes

Índice de huecos $m =$

Parámetros Hidráulicos

Caudal específico $q =$ m³/s/m

Calado crítico $hc =$ m

Energía específica mínima $Hmin =$ m

Coefficiente de descarga promedio $CqH =$

Longitud de reja con agua clara $L =$ m

Figura 7.6 Diseño de la interfaz gráfica de diseño de la reja en agua clara.

Perfil de Flujo

perfil

Caudal Derivado

q_acum

Exportar

Guardar figura

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS - DISEÑO EN AGUA CLARA

Tipos de Barra

Tipos_comp

Comparar Tipos

Exportar

Guardar figura

Tabla de Longitudes en función del Ancho de Reja

	1	2
1		
2		
3		
4		

Comparar Dimensiones

Borrar Tabla

Exportar tabla

Figura 7.7 Diseño de las secciones (a) “Figuras”, y (b) “Comparar”.

7.3.2.1 Información del Proyecto

Esta sección del programa permite el ingreso de información relativa a las condiciones de diseño de la reja de fondo como: el ancho de la sección del río donde se realizará la implantación de la obra (B_r), el caudal de diseño (Q_d) y el caudal de crecida (Q_{max}) —este último es un dato informativo, ya que no interviene en los cálculos posteriores— e incluye esquemas de los componentes de la captación de fondo y su simbología como se presenta en la Figura 7.8. En cambio, en la Figura 7.9, se presenta un ejemplo cuando se ejecuta el programa y se ha completado la información.

Figura 7.8 Detalle del diseño de la sección de Información del Proyecto.

Figura 7.9 Presentación de la sección de Información del Proyecto cuando se ejecuta el programa de cálculo en español.

7.3.2.2 Información de la Reja de Fondo

En esta sección se ingresa la información seleccionada para la reja como: el ancho de la captación (B), la pendiente longitudinal ($tg\theta$), alternativa de perfil de reja (cuerpo de pez, tipo T, o circular), ancho de la barra (b_w) y espaciamiento entre barras (b_1). El programa se encarga de calcular el índice de huecos con la información proporcionada.

Se incluye además esquemas del perfil de reja seleccionado y de los componentes de la reja con su simbología. En la Figura 7.10 se presenta la configuración de la sección; mientras que, en la Figura 7.11, se presenta la vista cuando se ejecuta el programa.

Figura 7.10 Detalle del diseño de la sección de Información de la Reja.

Figura 7.11 Presentación de la sección Información de la Reja.

7.3.2.3 Cálculo de Parámetros Hidráulicos

En esta sección del programa se presentan los cálculos de los parámetros hidráulicos que se describieron en el apartado 7.2.2. En la Figura 7.12 se puede ver el diseño de la sección en la interfaz gráfica; mientras que en la Figura 7.13 se presenta un ejemplo de presentación de los resultados en el programa.

Figura 7.12 Detalle del diseño de la sección de Parámetros Hidráulicos para agua clara.

Figura 7.13 Presentación de la sección Parámetros Hidráulicos.

7.3.2.4 Opciones de Ejecución

En la Figura 7.14 se presentan las opciones de ejecución del programa.

Figura 7.14 Detalle de las opciones de ejecución del programa.

En los apartados siguientes se describe brevemente la funcionalidad de cada opción de ejecución.

7.3.2.4.1 Calcular

Esta opción de ejecución comprueba que el usuario ha completado todos los campos de las secciones previas antes de realizar los cálculos de los parámetros hidráulicos asociados al funcionamiento de la reja y de la longitud necesaria para captar el caudal de diseño. En la Figura 7.15 se presenta la vista del programa al ejecutar la opción *Calcular*.

Figura 7.15 Presentación de la pantalla de programa cuando se ejecuta “Calcular”.

7.3.2.4.2 Figuras

Esta opción de ejecución realiza los cálculos y presenta los gráficos del perfil de flujo sobre la reja y el caudal derivado en una pantalla nueva como se muestra en la Figura 7.16.

Figura 7.16 Presentación de las figuras de perfil de flujo y caudal derivado cuando se ejecuta "Figuras" para el caso de barras con sección circular.

En el caso de la figura del perfil de flujo, se incluye también la ubicación de la reja con su pendiente longitudinal respectiva, y se marca sobre ella el punto donde se alcanza la longitud L_1 y el punto donde se alcanza la longitud de diseño, L . También se señala el valor del calado al inicio de la reja, h_o , considerado para la estimación de L_1 . En la figura de caudal derivado, en cambio, se señala el valor de caudal específico derivado al alcanzar la longitud L_1 y el caudal total en el punto correspondiente a L .

Adicionalmente, en esta ventana, se ofrece la opción de exportar la información a una hoja Excel (*.xlsx) para reproducir los gráficos o la de guardar las figuras en formato *.jpg.

7.3.2.4.3 Comparar

Esta opción de ejecución permite realizar comparaciones de la longitud de reja considerando los diferentes tipos de barras que contiene el programa o estableciendo un rango de variación para el ancho de captación. En el primer caso, el resultado se presenta en forma de gráfico y en el segundo en forma de tabla, como se puede observar en la Figura 7.17.

Figura 7.17 Opciones que presenta la ejecución de “Comparar”.

Esta sección del programa también ofrece la opción de exportar la información de la figura y de la tabla a una hoja Excel (*.xlsx) o la de guardar la figura en formato *.jpg.

7.3.2.4.4 Manual Técnico

Esta opción permite obtener un resumen de la metodología de cálculo utilizada en el programa, en formato pdf. Con esta alternativa, el usuario obtiene información para preparar una memoria de cálculo.

7.3.2.4.5 Variar Parámetros

Esta opción de ejecución permite modificar la información para realizar el diseño, sin limpiar la pantalla de los datos existentes.

7.3.2.4.6 Nuevo Cálculo

Esta opción regresa el programa al punto de partida.

7.3.2.4.7 Menú

Esta opción llama a la pantalla introductoria del programa, donde se puede escoger el tipo de diseño que se va a realizar y el idioma en el que se presentará la interfaz.

7.3.2.4.8 Salir

Esta opción se asegura que el usuario pretende abandonar el programa antes de cerrarlo.

7.3.3 INTERFAZ PARA DISEÑO CONSIDERANDO SEDIMENTOS

El diseño de la interfaz gráfica de dimensionamiento de rejillas de fondo para flujo con transporte de sedimentos presenta una configuración similar al caso de agua clara, como se puede observar en la Figura 7.18 y en la Figura 7.19; aunque la programación considera los parámetros propios del diseño considerando oclusión.

7.3.3.1 Información del Proyecto e Información de la Reja

Estas secciones del programa son similares a las presentadas en los apartados correspondientes al diseño para agua clara, y permiten ingresar las condiciones de diseño del proyecto y para la rejilla, como se muestra en la Figura 7.20 y en la Figura 7.21.

Una de las diferencias con respecto al diseño en agua clara consiste en la presentación de únicamente dos opciones de perfil de barra: tipo T y circular. De acuerdo con los estudios realizados en la UPCT, la rejilla con barras tipo T es la que presenta mejores características de funcionamiento en flujo con transporte de sedimentos, pero se coloca también la opción

de barra circular para que el usuario pueda realizar comparaciones. Se debe mencionar que, el programa advierte al usuario cuando selecciona barras circulares, que el perfil no es adecuado para este tipo de diseño.

Project Information

Diagram: corte_esquema

Diagram: planta_esquema

River width at derivation zone Br = m

Design Flow Qd = m³/s

River peak flow Qmax = m³/s

Bottom Rack Information

Bottom Rack Width B = m

Bottom Rack Longitudinal Slope tg θ = %

Select the bar type

Diagram: m_axes

Spacing between bars b1 = m

Bar Width bw = m

Void Ratio m =

Hydraulic Design Parameters

Specific flow q = m³/s/m

Bottom Rack Length (clear water) L = m

Critical depth hc = m

Minimum Energy Head Hmin = m

Occlusion factor f =

Average discharge coefficient CqH =

Final Bottom Rack Length Lf = m

Buttons: Run, Figures, Compare, Technical Manual, Change Rack Information, Reset, Menu, Exit

Figura 7.18 Diseño de la interfaz gráfica para diseño considerando sedimentos, en inglés.

(a) Figures

Flow Profile

Diagram: perfil

Derived Flow

Diagram: q_acum

Buttons: Export, Save Figures

(b) Compare

PARAMETERS COMPARATION - CONSIDERING OCCLUSION EFFECT

Bar Types

Diagram: Tipos_comp

Buttons: Compare Types, Export, Save Figure

Comparison Table - Bottom Rack Width

	1	2
1		
2		
3		
4		

Buttons: Compare Dimensions, Reset Table, Export table

Figura 7.19 Diseño de las secciones (a) “Figures”, y (b) “Compare”, en inglés

Project Information

River width at derivation zone $Br = 23$ m

Design Flow $Qd = 2.1$ m³/s

River peak flow $Qmax = 290$ m³/s

[Run](#)

[Figures](#)

Figura 7.20 Presentación de la sección Información del Proyecto, en inglés.

Bottom Rack Information

Bottom Rack Width $B = 10$ m

Bottom Rack Longitudinal Slope $tg \theta = 30$ %

Spacing between bars $b1 = 0.013$ m

Bar Width $bw = 0.03$ m

Void Ratio $m = 0.30$

[T-shaped](#)

[Compare](#)

[Technical Manual](#)

[Change Rack Information](#)

Figura 7.21 Presentación de la sección Información de la Reja, en inglés.

7.3.3.2 Cálculo de Parámetros Hidráulicos

En esta sección se presentan los cálculos de los parámetros hidráulicos del diseño como caudal específico, q ; calado crítico, h_c ; energía específica mínima, H_{min} ; y el coeficiente de descarga medio de la reja, C_{qH} . El cálculo de la dimensión longitudinal de la reja se presenta con tres valores: la longitud de reja para captación con agua clara, L , el factor de efecto de oclusión, f , y longitud de reja que considera el posible efecto de la oclusión, L_f . El detalle de la sección se muestra en la Figura 7.22.

Hydraulic Design Parameters

Specific flow $q = 0.21$ m³/s/m

Critical depth $hc = 0.17$ m

Minimum Energy Head $Hmin = 0.25$ m

Average discharge coefficient $CqH = 0.178$

Bottom Rack Length (clear water) $L = 1.77$ m

Occlusion factor $f = 1.40$

Final Bottom Rack Length $L_f = 2.50$ m

[Reset](#)

[Menu](#)

[Exit](#)

Figura 7.22 Presentación de la sección Parámetros Hidráulicos, en inglés.

7.3.3.3 Opciones de Ejecución

En la Figura 7.23 se presentan las opciones de ejecución del programa.

Figura 7.23 Detalle de las opciones de ejecución del programa, en inglés.

En los apartados siguientes se describe brevemente la funcionalidad de cada opción de ejecución.

7.3.3.3.1 *Run (Calcular)*

Esta opción tiene la misma funcionalidad que en el caso de diseño para agua clara descrito en el apartado 7.3.2.4.1, como se puede observar en la Figura 7.24.

Figura 7.24 Presentación de la pantalla de programa cuando se ejecuta “Run”.

7.3.3.3.2 *Figures (Figuras)*

Esta opción de ejecución realiza los cálculos y presenta los gráficos del perfil de flujo sobre la reja y el caudal derivado, en una pantalla nueva, como se muestra en la Figura 7.25.

Figura 7.25 Presentación de las figuras de perfil de flujo y caudal derivado cuando se ejecuta “Figures” para el caso de barras con sección circular.

7.3.3.3.3 Compare (Comparar)

Presenta las comparaciones de longitud de reja considerando los diferentes tipos de barras que contiene el programa o estableciendo un rango de variación para el ancho de captación, con las mismas funcionalidades que en el diseño de agua clara. Un ejemplo se presenta en la Figura 7.26.

7.3.3.3.4 Technical Manual (Manual Técnico), Change Rack Information (Variar Parámetros), Reset (Nuevo Cálculo), Menu (Menú), Exit (Salir)

La funcionalidad de estas opciones es similar al diseño en agua clara.

Figura 7.26 Opciones que presenta la ejecución de “Compare”.

7.4 MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA

El programa de dimensionamiento de rejillas de fondo está configurado para guiar al usuario en el diseño de una rejilla de fondo para captación de agua en condiciones de aproximación subcrítica de flujo, por lo que se advierte a los usuarios del programa tener en consideración esta condición en el momento de utilizar la herramienta.

En el Manual de Usuario se presentan las instrucciones de uso del programa. Para consultar la metodología utilizada para realizar el diseño de la rejilla de fondo se debe consultar el Manual Técnico que se menciona más adelante.

7.4.1 PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA

La pantalla de inicio contiene un menú desplegable que permite escoger el idioma en el que se presentarán las opciones de ejecución y botones con los que se accede a la pantalla de diseño en condiciones de agua clara (cuando el río contiene escaso material de arrastre) o considerando oclusión (cuando el río presenta considerable arrastre de material sólido) como se puede observar en la Figura 7.27.

Figura 7.27 Pantalla de presentación del programa y opciones: (a) menú desplegable, (b) pantalla en español, y (c) pantalla en inglés

Al presionar la opción “Acerca de / About” se despliega una breve descripción de las recomendaciones de diseño en las que se basa el programa como se puede observar en la Figura 7.28.

Figura 7.28 Pantalla de presentación cuando se ejecuta la opción “Acerca de / About”.

Con el botón “Manual de Usuario” / “User Guide”, se presenta un documento con las instrucciones de uso del programa en formato pdf. El botón “Salir / Exit” solicitará una confirmación al usuario de la acción solicitada antes de realizarla, como se puede observar en la Figura 7.29; y finalmente, el botón “Idioma / Language” vuelve a presentar el menú desplegable de opciones de idioma como se puede observar en la Figura 7.30.

Figura 7.29 Pantalla de presentación cuando se ejecuta la opción “Salir / Exit”.

Figura 7.30 Presentación del menú desplegable cuando se ejecuta la opción “Idioma / Language”.

Cuando se escoge una de las opciones para realizar el dimensionamiento de la reja de fondo, se presenta una pantalla diferente de acuerdo con la opción seleccionada, en el idioma escogido.

7.1.1 DISEÑANDO UNA REJA PARA CAPTACIÓN DE FONDO

Aunque la presentación del programa de diseño para agua clara y considerando sedimentos varía ligeramente, la funcionalidad es muy similar, por lo que las instrucciones de uso de esta sección son válidas para las dos condiciones.

7.1.1.1 Información para Realizar el Diseño

La información necesaria para que el programa realice el dimensionamiento de la reja se presenta en dos secciones principales: Información del Proyecto e Información de la Reja. Estas secciones presentan gráficas que permiten al usuario identificar la nomenclatura

utilizada en cada campo y conocer las partes de la estructura que se consideran para el diseño. En la Figura 7.31 se muestra la vista de estas secciones en la pantalla de diseño de agua clara.

The screenshot shows two main sections of the software interface:

- Información del Proyecto:** Contains two diagrams. The left diagram shows a cross-section of a river with a weir, labeled with Q_d , L , L_1 , and θ . The right diagram shows a plan view of the weir structure with labels Q_d , B_r , and B . Below the diagrams are input fields: 'Ancho del río en la zona de captación' with $B_r =$ [] m, 'Caudal de diseño' with $Q_d =$ [] m^3/s , and 'Caudal de máxima crecida' with $Q_{max} =$ [] m^3/s . Buttons for 'Calcular' and 'Figuras' are present.
- Información de la Reja:** Contains input fields for 'Ancho de la reja' ($B =$ [] m), 'Pendiente longitudinal de la reja' ($tg \theta =$ [] %), 'Tipo de barra' (a dropdown menu), 'Espaciamiento entre barras' ($b1 =$ [] m), 'Ancho de la barra' ($b_w =$ [] m), and 'Índice de Huecos' ($m =$ []). A 'Seleccione' dropdown is also present. Buttons for 'Comparar', 'Manual Técnico', and 'Variar parámetros' are located on the right.

Figura 7.31 Secciones de información para diseño en agua clara.

La primera sección solicita información relativa al proyecto de diseño como: ancho del río en la zona de captación, caudal de diseño y caudal de máxima crecida. El valor del caudal de máxima crecida es referencial y no interviene en los cálculos posteriores. En la Figura 7.32 se presenta un ejemplo de la sección con sus campos llenos. La sección corresponde a la pantalla de diseño considerando sedimentos.

This screenshot shows the 'Información del Proyecto' section with example data entered:

- Diagramas:** The left diagram now includes L_f in addition to the other labels. The right diagram remains the same.
- Inputs:** 'Ancho del río en la zona de captación' $B_r = 35$ m, 'Caudal de diseño' $Q_d = 5.6$ m^3/s , and 'Caudal de máxima crecida' $Q_{max} = 290$ m^3/s .
- Buttons:** The 'Calcular' button is highlighted, and the 'Figuras' button is enclosed in a dashed box.

Figura 7.32 Sección Información del Proyecto con sus campos completos. Pantalla de diseño considerando sedimentos.

La segunda sección requiere información sobre la geometría de la reja. Aquí se presentan campos que deben completarse —como el ancho y la pendiente longitudinal de la reja; o el espaciamiento entre barras y el ancho de la barra—; y campos que deben seleccionarse como el tipo de barra. En la Figura 7.33 se presentan los tipos de barra —nombre y perfil gráfico de la barra— que considera el programa para el diseño de rejillas de captación con agua clara sin un orden en particular.

Figura 7.33 Opciones de selección de tipo de barra.

Para el caso de diseño considerando sedimentos solo se consideran las barras tipo T y circulares, de acuerdo con los trabajos experimentales desarrollados en la Universidad Politécnica de Cartagena.

En la Figura 7.34 se presenta un ejemplo de esta sección con sus campos llenos y la selección de tipo de barra, realizadas.

Figura 7.34 Sección Información de la Reja con sus campos completos.

Es importante que todos los campos de las secciones introductorias contengan información numérica (a excepción del caudal de máxima crecida) y que el tipo de barra haya sido

seleccionado para iniciar el dimensionamiento en el programa. Si alguno de estos campos no contiene información, se envían alertas como las que se presentan en la Figura 7.35:

Figura 7.35 Mensajes de alerta sobre información incompleta en las secciones introductorias del programa.

7.1.1.2 Ejecución del Programa

Cuando la información de diseño del proyecto y de la reja se ha completado, el programa presenta algunas alternativas de ejecución como se muestra en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 Opciones de ejecución del programa

Opción de Ejecución	Descripción
<p>Realiza los cálculos de los parámetros hidráulicos asociados al funcionamiento de la reja.</p> <p>Dimensiona la longitud de reja necesaria para captar el caudal de diseño.</p> <p>“Calcular” se deshabilita una vez que se ha utilizado. Para volver a activarla se puede recurrir a las opciones “Variar Parámetros” o “Nuevo”.</p>
<p>Presenta gráficos de perfil de flujo y caudal de derivación a lo largo de la reja en una pantalla nueva.</p> <p>Ofrece la opción de exportar la información de los gráficos a una hoja Excel o la de guardar las figuras en formato *.jpg.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> </div> <p>“Figuras” se activa cuando se ejecuta la alternativa “Calcular” y vuelve a deshabilitarse una vez que se ha utilizado.</p> <p>Cuando se realiza el diseño con agua clara, esta opción está disponible únicamente para los tipos de barra ensayados en la UPCT; es decir, barras tipo T y circulares.</p>

Opción de Ejecución	Descripción
<p>“Comparar” ofrece al usuario la posibilidad de realizar dos tipos de comparaciones en una pantalla nueva.</p> <div> </div> <p>Al igual que en la sección anterior, se ofrece la opción de exportar la información a una hoja Excel (figura y tabla) o la de guardar la figura.</p>
<p>Presenta una gráfica con la variación de la longitud de reja en función del caudal, para los tres tipos de reja considerados dentro del programa.</p> <div> </div>
<p>Presenta una tabla con la variación de la longitud de reja en función del ancho de la reja para el caudal de diseño del proyecto.</p> <p>El usuario puede analizar las opciones de dimensionamiento con visión de optimización del diseño, seleccionando el rango de variación del ancho de captación y el número de comparaciones.</p> <div> <p>Por defecto el programa señala como valor inicial de ancho de reja para la comparación 1.0 m y como valor final: 10.0 m, siendo el número de comparaciones igual a 10.</p> </div> <p>Esta opción se desactiva después de utilizarse; y vuelve a habilitarse con la opción “Borrar Tabla”.</p> <div> </div>
<p>Presenta una descripción de la metodología de cálculo y la base teórica utilizada en el programa en formato pdf.</p>
<p>Permite cambiar la información de diseño manteniendo en pantalla los datos que hayan sido introducidos con anterioridad. Limpia la pantalla de los cálculos que se hayan realizado. Activa la opción “Calcular” y deshabilita las opciones “Figuras” y “Comparar”.</p>
<p>Regresa el programa al punto de partida para iniciar un nuevo diseño. Limpia la pantalla de los cálculos que se hayan realizado. Activa la opción “Calcular” y deshabilita las opciones “Figuras” y “Comparar”.</p>
<p>Llama a la pantalla introductoria del programa donde se puede escoger el idioma de la interfaz, así como el tipo de diseño que se realizará —en agua clara o con sedimentos—.</p>

Opción de Ejecución	Descripción
<p>Presenta al usuario la opción de abandonar o permanecer en el programa.</p>

7.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A fin de comprobar la funcionalidad del programa, se realizaron pruebas de diseño considerando la información de los proyectos desarrollados en Ecuador y que se presentaron en la Tabla 1.1 y en la Tabla 1.2 y se las comprobó con las longitudes de diseño de cada uno (Escuela Politécnica Nacional, 2008; ASTEC, 2012; Andrade y Heredia, 2013). El resultado se presenta en la Figura 7.36.

Figura 7.36 Comparación de las longitudes obtenidas con el programa y aquellas proporcionadas por los estudios de diseño (a) en agua clara, y (b) considerando arrastre de sedimentos.

En la Figura 7.36a, se puede observar que las longitudes calculadas con el programa de dimensionamiento para agua clara, en algunos casos, presentan longitudes similares a las longitudes de diseño; mientras que, en otros casos, presenta valores más conservadores.

En la Figura 7.36, que corresponde al diseño considerando transporte de sedimentos, las longitudes calculadas exceden, en todos los casos, a las longitudes de diseño. Sin embargo, cabe mencionar que únicamente en el caso del Proyecto Jondachi – Sardinas, Andrade y Heredia (2013) reportan un incremento del 20% de la longitud mínima de diseño para considerar el posible efecto de la oclusión en la reja con barras tipo T. En el caso del

estudio presentado en este trabajo, el porcentaje incremento de la longitud corresponde al 40%.

En la Figura 7.37 se presentan comparaciones de las longitudes obtenidas con el programa de diseño y algunas formulaciones provenientes de la literatura técnica. Específicamente, la Figura 7.37a, presenta los resultados del programa para diseño con barras circulares en agua clara considerando una pendiente longitudinal del 20% y $m = 0.60$; en comparación con los resultados presentados por Drobir et al. (1999). Aquí se puede observar que los valores que se obtienen con el programa tanto para la longitud de diseño como para la longitud L_1 se ajustan a las mediciones de Drobir et al.

En el caso de la Figura 7.37b, se presenta la comparación de los resultados del programa utilizando barras tipo T, pendiente longitudinal del 30% e índice de huecos de 0.28. La comparación se realiza con las ecuaciones propuestas por Krochin (1978) considerando las dos condiciones de diseño: agua clara y transporte de sedimentos.

Aquí se puede observar que, tanto para el caso de agua clara como para el diseño considerando transporte de sedimentos, el programa obtiene longitudes de diseño menores a aquellas obtenidas con las expresiones de Krochin para caudales específicos de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ en adelante. También se puede observar que, la tendencia de las longitudes de diseño considerando transporte de sedimentos, se mantiene entre los límites marcados por las dos condiciones de oclusión propuestas por Krochin.

Figura 7.37 Relación de longitud de reja sobre calado crítico en función del caudal de captación para (a) $m = 0.60$ y pendiente del 20; diseño con agua clara y barras circulares, y (b) $m = 0.28$ y pendiente del 30%; diseño considerando arrastre de sedimentos y barras tipo T.

7.6 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

En el Apéndice III se presenta el código de programación empleado para generar las interfaces de diseño en agua clara y considerando transporte de sedimentos.

CAPITULO 8

APORTACIONES, CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

“Acuérdate, cuando estudies el agua, de alegar primero la experiencia y después la razón”
(Leonardo Da Vinci).

8.1 APORTACIONES

Las principales aportaciones del presente trabajo son:

- Se ha realizado una revisión del estado del arte de los sistemas de captación de fondo, complementando la información presentada por García (2016) en su tesis doctoral en cuanto a: formulaciones de dimensionamiento de reja de fondo y estimación del coeficiente de descarga, análisis dimensional para definir los principales parámetros que influyen en el comportamiento del flujo, modelaciones numéricas utilizando Dinámica de Fluidos Computacional, investigaciones con flujo de aproximación supercrítico e investigaciones considerando arrastre de sedimentos.
- Siguiendo la metodología desarrollada por García (2016) para su estudio de los sistemas de captación de fondo con barras tipo T; se han realizado campañas de medición en laboratorio empleando rejas con barras circulares para determinar: el perfil de flujo, el caudal captado por tramos de reja y el porcentaje de obstrucción de la reja en presencia de sedimentos. Para estas mediciones se consideraron diferentes caudales de aproximación y pendientes longitudinales de reja en dos configuraciones de índices de huecos —0.28 y 0.60—

El análisis de estas campañas experimentales, además, ha permitido presentar propuestas de cálculo para algunos parámetros hidráulicos de la reja como las longitudes L_1 (máxima longitud que alcanza el flujo entre dos barras consecutivas) y la longitud de diseño, L —que representa la máxima longitud que alcanza el flujo sobre la barra—, según las definiciones de Drobir et al. (1999); y el coeficiente de descarga variable para las dos configuraciones de reja con barras circulares, el índice de huecos efectivo para la reja con índice de huecos igual a 0.28; así como aproximaciones para el cálculo del calado al inicio de la reja en función del calado crítico que permitieron realizar comparaciones con propuestas de otros autores. Adicionalmente se realiza una comparación entre las capacidades de captación de los dos tipos de reja —con barras circulares y tipo T— a fin de determinar su eficiencia de captación y de determina el factor de obstrucción.

- Se presenta una metodología para realizar el dimensionamiento de la longitud de la reja, L , para sistemas de captación de fondo con agua clara (García et al., 2018a), aplicando análisis empírico, dimensional e inspeccional a las mediciones de laboratorio realizadas para el desarrollo de la tesis doctoral de García (2016) —barras tipo T— y al presente trabajo de investigación —barras circulares—.
- Se realiza una recopilación de experiencias y recomendaciones para realizar el diseño de la reja para sistemas de captación de fondo y se los utiliza para proponer un programa de dimensionamiento —en entorno MATLAB— en condiciones de agua clara y considerando sedimentos. En este programa se recogen las experiencias realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT, así como información disponible en la literatura técnica.

8.2 CONCLUSIONES

Entre las conclusiones obtenidas con el presente estudio se encuentran:

8.2.1 SOBRE LA INFORMACIÓN RECOPIADA DE LA LITERATURA TÉCNICA

- No existe una metodología general para realizar el dimensionamiento de sistemas de captación de fondo. Después de revisar algunas memorias de cálculo de estudios de pequeñas centrales de generación hidroeléctrica desarrollados en Ecuador, las recomendaciones de diseño que se utilizan provienen de Krochin (1978) empleando barras prismáticas o tipo T, o de Frank (1976); estas últimas han sido recopiladas en algunos estudios o manuales sobre diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas o sistemas de riego (Andaroodi y Schleiss, 2006; Lauterjung y Schmidt, 1989; Ortiz, 2011; Programa Nacional de Riego, 2002).
- Para realizar el procedimiento de análisis dimensional la mayoría de los investigadores plantea como variables determinantes a los parámetros que conforman la geometría de la reja; y determina, en casi todos los casos, la influencia de al menos un número adimensional como Froude, Reynolds o Weber.
- A pesar del número de investigaciones que se han desarrollado en sistemas de captación de fondo, aún existe incertidumbre en el efecto que producen los sedimentos al pasar sobre la reja y la forma en la que se depositan sobre la reja. Las recomendaciones que se encuentran en la literatura técnica se asocian a una configuración específica de reja de fondo, así como a experiencias en prototipos de captaciones.

- Cuando se habla de diseño de captaciones de fondo para fines de generación hidroléctrica, el efecto del material sólido de arrastre adquiere principal importancia. Los diseñadores normalmente tienen que superar problemas como la escasa información disponible sobre caudal sólido o la incertidumbre en el efecto de la oclusión en las rejas en la disminución de la capacidad de captación.

8.2.2 SOBRE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON REJAS DE BARRAS CIRCULARES

- La pendiente longitudinal de la reja tiene una evidente influencia en el comportamiento del flujo sobre rejas de fondo con barras circulares. Para caracterizar el perfil de flujo, calado y velocidad media al inicio de la reja, y las longitudes de reja L_1 y L_2 se incluye el término $(1 + tg\theta)$ a fin de obtener un ajuste que produzca resultados cercanos a la realidad (con errores de aproximadamente 15%).
- Aún no se ha conseguido generalizar una propuesta de cálculo del coeficiente de descarga para rejas con barras circulares. En el caso del presente estudio, se obtuvieron diferentes propuestas de cálculo de este coeficiente (una expresión para $m = 0.28$ y dos expresiones complementarias para $m = 0.60$). Se necesita realizar mayores ensayos con diferentes configuraciones de índices de huecos a fin de comprender mejor el desempeño de la reja.
- En la caracterización de las longitudes de reja L_1 y L_2 se observa la influencia de la pendiente en estos parámetros.
- La combinación de análisis dimensional, inspeccional y tratamiento empírico en estudios hidráulicos permiten tener un mejor conocimiento del fenómeno de flujo y plantear expresiones para caracterizar los principales parámetros que intervienen en un diseño, como en este caso particular de sistemas de captación con reja de fondo.
- Empleando análisis empírico, dimensional e inspeccional (García et al., 2018a), se observa la relación que presentan algunos números adimensionales (Froude, Reynolds y Weber) en el comportamiento del flujo, y permite determinar la influencia de la viscosidad y la tensión superficial en los ensayos realizados en el modelo de laboratorio (efectos de escala).
- Gracias a la combinación de análisis empírico, dimensional e inspeccional se propone una metodología nueva para el cálculo de la longitud de la reja, generalizada para diversos caudales, índices de huecos y tipos de barra.
- Después de realizar algunas comparaciones entre las capacidades de captación con rejas conformadas por barras tipo T y barras circulares en presencia de arrastre de

sedimentos (Figura 5.26), se observa que estas últimas presentan bajas eficiencias de captación. A pesar de que la capacidad de captación, en el caso de las barras circulares, parece aumentar con el incremento de la pendiente longitudinal, la tendencia permanece por debajo de la capacidad de captación de las rejas con barras tipo T.

- Al iniciar los ensayos con gravas en la reja circular con índice de huecos $m = 0.60$ se observó que la longitud original de la reja colocada en el sistema de captación de fondo favorecía el depósito de material sólido sobre reja, generando un efecto de retención que modificaba las condiciones de aproximación del flujo (al incrementarse el calado aguas arriba) y por lo tanto disminuía la capacidad de arrastre del agua; con lo cual se puede corroborar la afirmación de Vargas (1998) sobre una longitud excesiva de reja (sobredimensionamiento) que favorezca la acumulación de material sólido al cambiar el escenario de una crecida a caudales ordinarios bajos.

8.2.3 SOBRE LA PROPUESTA DE SOFTWARE DE DIMENSIONAMIENTO

- Es importante determinar el objetivo a cumplir cuando se quiere desarrollar una herramienta computacional de diseño y pensar en el usuario final al momento de estructurarlo.
- Un programa de ayuda para el cálculo de cualquier estructura se constituye en una herramienta importante para el diseñador siempre y cuando se recuerde que el criterio ingenieril y la experiencia son componentes primordiales del proceso de cálculo que no pueden ser reemplazados.
- El software de dimensionamiento propuesto (Haro et al., 2019) permite realizar el diseño de la longitud de la reja en agua clara o considerando arrastre de sedimentos, tomando en consideración la variación de diferentes parámetros como el índice de huecos, el caudal de diseño, el tipo de barra y pendientes longitudinales de reja.

8.3 FUTUROS DESARROLLOS

Los trabajos desarrollados previamente en la UPCT han recopilado y analizado la base teórica y las experiencias de la literatura técnica sobre el dimensionamiento de sistemas de captación de fondo y su comportamiento ante la presencia de sedimentos; y también se han realizado mediciones en laboratorio utilizando dos tipos de rejas de fondo: con barras tipo T e índices de huecos entre 0.16 y 0.28 (García, 2016) y con barras circulares con índices de huecos de 0.28 y 0.60 (el presente trabajo). Para los dos tipos de rejas se realizaron caracterizaciones del coeficiente de descarga y del perfil de flujo utilizando agua

clara y también se analizó la variación del índice de huecos en presencia de flujo con sedimentos, con flujo de aproximación subcrítico.

Para futuros desarrollos podría considerarse el estudio de diferentes perfiles de barra para rejas, como los recopilados en el estudio de García et al. (2018b) y que se muestran en la Figura 8.1; y caracterizar sus coeficientes de descarga; así como su comportamiento ante flujo con sedimentos, puesto que actualmente —en la literatura técnica— se cuentan con factores de incremento de longitud de reja “basados en la experiencia” que podrían confirmarse con mediciones de laboratorio.

Una condición importante, en países de la Región Andina, es el flujo supercrítico presente en los ríos de montaña. En futuros desarrollos podría analizarse la influencia del régimen de flujo en la capacidad de captación de los sistemas de fondo y su efecto en la reja cuando existe arrastre de sedimentos. Un punto de partida se constituyen los trabajos de Righetti y Lanzoni (2008), Wong (2009), Chan et al. (2018) o Chan y Lee (2018).

Continuar con la mejora e implementación de nuevos anexos de cálculo al programa de diseño desarrollado durante el presente trabajo, considerando nuevos valores experimentales para diferentes tipos de barras; o incluyendo propuestas de diseño para otros elementos importantes del sistema de captación de fondo.

a) Agua clara (Drobir, 1981; Frank y Von Obering, 1956; Frank, 1959)

b) Flujo con transporte de sedimentos (Andaroodi y Schleiss, 2006 y García et al., 2018b)

c) Longitud de contacto grava – barra en el caso de barras circulares (izquierda) y prismáticas con cresta cilíndrica (derecha)

Figura 8.1 Esquema de perfiles de barra óptimos que pueden utilizarse para el diseño de una captación de fondo (a) en caso de agua clara, (b) en caso de flujo con sedimentos, y (c) esquema de la longitud de contacto grava – barra para visualizar la influencia del radio del perfil circular en la oclusión de rejas circulares (García et al., 2018b).

APÉNDICE I

DESARROLLO DE ALGUNAS EXPRESIONES RECOPIADAS DE LA LITERATURA TÉCNICA

A1.1. GAROT (1939)

Si se toman las ecuaciones

$$\frac{dq}{dx} = C_{qh} m \sqrt{2gH} \rightarrow \frac{dQ}{dx} = -C_{qh} b m \sqrt{2gh} \quad (1.2)$$

$$H = z + h + \alpha \frac{V^2}{2g} \rightarrow H = h + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1.4)$$

$$\frac{V^2}{2g} = H - h \rightarrow V = \sqrt{2g(H - h)}$$

$$Q = (B h) V \rightarrow Q = B h \sqrt{2g(H - h)} \quad (A1.1)$$

Y se deriva la ecuación (1.4) con respecto a x , considerando que el coeficiente de Coriolis, $\alpha = 1.0$, se obtiene la ecuación (1.5):

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left(h + \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{d}{dx} \left(h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2} \right) = 0$$

$$\frac{dh}{dx} + \frac{2Q}{2gb^2h^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{2hQ^2}{2gb^2h^4} \frac{dh}{dx} = 0$$

$$(gb^2h^3 - Q^2) \frac{dh}{dx} + hQ \frac{dQ}{dx} = 0$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{hQ}{Q^2 - gb^2h^3} \frac{dQ}{dx} \quad (A1.2)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.2) y (A1.1) en la ecuación (A1.2) se tiene:

$$\frac{dh}{dx} = - \frac{2C_{qh} m \sqrt{h(H - h)}}{2H - 3h} \quad (A1.3)$$

Se despeja dx y se realiza la integral entre h y H (considerado como carga de energía).

$$dx = \frac{2H - 3h}{-2C_{qh} m \sqrt{h(H - h)}} dh$$

$$x = \frac{2H - 3h}{-2mC_{qh} \sqrt{h(H - h)}} dh$$

$$\begin{aligned}
 x &= -\frac{1}{2mC_{qh}} \int_h^H \frac{2H-3h}{\sqrt{h(H-h)}} dh \\
 x &= -\frac{1}{2mC_{qh}} \left[\int_h^H \frac{2H}{\sqrt{h(H-h)}} dh - \int_h^H \frac{3h}{\sqrt{h(H-h)}} dh \right] \\
 x &= -\frac{2H}{2mC_{qh}} \int_h^H \frac{dh}{\sqrt{Hh-h^2}} + \frac{3}{2mC_{qh}} \int_h^H \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{H-h}} dh
 \end{aligned}$$

Cada integral puede analizarse por separado, considerando:

$$\begin{aligned}
 x &= -\frac{H}{mC_{qh}} I_1 + \frac{3}{2mC_{qh}} I_2 \tag{A1.4} \\
 I_1 &= \int_h^H \frac{dh}{\sqrt{Hh-h^2}} = \int_h^H \frac{dh}{\sqrt{\frac{2}{2}Hh-h^2 + \frac{H^2}{4} - \frac{H^2}{4}}} = \int_h^H \frac{dh}{\sqrt{\frac{H^2}{4} - \left(h - \frac{H}{2}\right)^2}}
 \end{aligned}$$

Si se realiza un cambio de variable para I_1 :

$$\begin{aligned}
 \left(h - \frac{H}{2}\right) &= \frac{H}{2}t \rightarrow dh = \frac{H}{2}dt \\
 I_1 &= \int_h^H \frac{\frac{H}{2}}{\sqrt{\frac{H^2}{4} - \frac{H^2}{4}t^2}} dt = \int_h^H \frac{\frac{H}{2}}{\sqrt{\frac{H^2}{4}(1-t^2)}} dt = \int_h^H \frac{1}{\sqrt{(1-t^2)}} dt \\
 I_1 &= \arcsen(t) = \arcsen\left[\frac{2h-H}{H}\right]_h^H \tag{A1.5} \\
 I_2 &= \int_h^H \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{H-h}} dh
 \end{aligned}$$

Si se realiza un cambio de variable para I_2 :

$$\begin{aligned}
 u &= \sqrt{h} \rightarrow du = \frac{1}{2\sqrt{h}} dh \\
 I_2 &= \int_h^H \frac{u}{\sqrt{H-u^2}} 2udu = \int_h^H -2u \left(\frac{-u}{\sqrt{H-u^2}} du \right) = \int_h^H -2u d(\sqrt{H-u^2})
 \end{aligned}$$

Si se integra por partes:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= -2u(\sqrt{H-u^2}) + 2 \int_h^H (\sqrt{H-u^2}) du \\
 I_2 &= -2u(\sqrt{H-u^2}) + 2 \int_h^H (\sqrt{H-u^2}) \frac{\sqrt{H-u^2}}{\sqrt{H-u^2}} du
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= -2u \left(\sqrt{H-u^2} \right) + 2 \int_h^H \frac{H du}{\sqrt{H-u^2}} - \int_h^H \frac{2u^2}{\sqrt{H-u^2}} du \\
 I_2 &= -2u \left(\sqrt{H-u^2} \right) + 2H \int_h^H \frac{du}{\sqrt{H-u^2}} - I_2 \\
 I_2 &= -u \left(\sqrt{H-u^2} \right) + H \left(\arcsen \frac{u}{\sqrt{H}} \right) \\
 I_2 &= \left[-\sqrt{h}(\sqrt{H-h}) + H \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) \right]_h^H \quad (A1.6)
 \end{aligned}$$

Si se reemplazan las ecuaciones (A1.5) y (A1.6) en (A1.4) y se aplican los límites:

$$x_H - x_h = -\frac{H}{mC_{qh}} \arcsen \left[\frac{2h-H}{H} \right]_h^H + \frac{3}{2mC_{qh}} \left[H \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) - \sqrt{h}(\sqrt{H-h}) \right]_h^H \quad (A1.7)$$

$$* \arcsen \left[\frac{2h-H}{H} \right]_h^H = \arcsen \left(\frac{2H-H}{H} \right) - \arcsen \left(\frac{2h-H}{H} \right) = \arcsen(1) - \arcsen \left(\frac{2h-H}{H} \right)$$

$$\arcsen \left[\frac{2h-H}{H} \right]_h^H = \frac{\pi}{2} - \arcsen \left(\frac{2h-H}{H} \right)$$

$$** \left[H \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) - \sqrt{h}(\sqrt{H-h}) \right]_h^H = H \arcsen(1) - H \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) + -\sqrt{h}(\sqrt{H-h})$$

$$\left[H \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) - \sqrt{h}(\sqrt{H-h}) \right]_h^H = H \frac{\pi}{2} - H \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) + -\sqrt{h}(\sqrt{H-h})$$

$$x_H - x_h = \frac{H}{mC_{qh}} \left[\arcsen \left(\frac{2h-H}{H} \right) - \frac{\pi}{2} + \frac{3}{4}\pi - \frac{3}{2} \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) + \frac{3}{2H} \sqrt{h}(\sqrt{H-h}) \right]$$

$$x_H - x_h = \frac{H}{mC_{qh}} \left[\frac{\pi}{4} + \arcsen \left(\frac{2h-H}{H} \right) + \frac{3}{2H} \sqrt{h(H-h)} - \frac{3}{2} \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) \right]$$

$$x_H - x_h = \frac{H}{mC_{qh}} \left[\frac{\pi}{4} + \arcsen \left(2 \frac{h}{H} - 1 \right) + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{hH}{H^2} - \frac{h^2}{H^2}} - \frac{3}{2} \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) \right]$$

$$x_H - x_h = \frac{H}{mC_{qh}} \left[\frac{\pi}{4} + \arcsen \left(2 \frac{h}{H} - 1 \right) + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H} \right)^2} - \frac{3}{2} \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right) \right]$$

$$\Phi \left[\frac{h}{H} \right] = \frac{\pi}{4} + \arcsen \left(2 \frac{h}{H} - 1 \right) + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H} \right)^2} - \frac{3}{2} \arcsen \left(\sqrt{\frac{h}{H}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 &\rightarrow \arcsen(x) - \arcsen(y) = \arcsen\left(x\sqrt{1-y^2} - y\sqrt{1-x^2}\right) \\
 &\Phi\left[\frac{h}{H}\right] = \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H}\right)^2} + \left[\arcsen\left(2\frac{h}{H} - 1\right) - \arcsen\left(\sqrt{\frac{h}{H}}\right)\right] - \frac{1}{2}\arcsen\left(\sqrt{\frac{h}{H}}\right) \\
 &\Phi\left[\frac{h}{H}\right] = \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H}\right)^2} - \frac{1}{2}\arcsen\sqrt{\frac{h}{H}} + \arcsen\left[\left(2\frac{h}{H} - 1\right)\sqrt{1 - \frac{h}{H}} - \sqrt{\frac{h}{H}}\sqrt{1 - \left(\frac{2h}{H} - 1\right)^2}\right] \\
 &\Phi\left[\frac{h}{H}\right] = \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H}\right)^2} - \frac{1}{2}\arcsen\sqrt{\frac{h}{H}} + \arcsen\left[\left(2\frac{h}{H} - 1\right)\sqrt{1 - \frac{h}{H}} - \sqrt{\frac{h}{H}}\sqrt{1 - \left(\frac{2h}{H} - 1\right)^2}\right] \\
 &\Phi\left[\frac{h}{H}\right] = \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H}\right)^2} - \frac{1}{2}\arcsen\sqrt{\frac{h}{H}} + \arcsen\left[2\frac{h}{H}\sqrt{1 - \frac{h}{H}} - \sqrt{1 - \frac{h}{H}} - 2\frac{h}{H}\sqrt{1 - \frac{h}{H}}\right] \\
 &\Phi\left[\frac{h}{H}\right] = \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\sqrt{\frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H}\right)^2} - \frac{1}{2}\arcsen\sqrt{\frac{h}{H}} - \arcsen\sqrt{1 - \frac{h}{H}} \quad (1.11)
 \end{aligned}$$

Si se conocen h_1 y h_2 —que representan los calados de agua al inicio y al final de la reja respectivamente—, y los caudales que les corresponden Q_1 y Q_2 , se puede calcular la longitud de la reja como sigue:

$$\begin{aligned}
 L &= (x_H - x_{h1}) - (x_H - x_{h2}) = x_{h1} - x_{h2} \\
 L &= x_{h1} - x_{h2} = \frac{H}{mC_{qh}} \left(\Phi\left[\frac{h_2}{H}\right] - \Phi\left[\frac{h_1}{H}\right] \right) \quad (A1.8)
 \end{aligned}$$

A1.2. FRANK (1956)

Figura A1.1. Esquema de los componentes utilizados en el planteamiento de las ecuaciones de Frank (1956).

Si se considera:

$$Q = (B h) V \rightarrow q = h V \rightarrow V = \frac{q}{h} \quad (A1.9)$$

$$H = h \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \rightarrow \text{si: } \alpha = 1.0 \rightarrow H = h \cos \theta + \frac{q^2}{2gh^2} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned}\frac{q^2}{2g} &= h^2(H - h\cos\theta) \rightarrow \frac{q^2\cos^2\theta}{2gH^3} = \frac{h^2\cos^2\theta}{H^2} \left(\frac{H}{h} - \frac{h}{H}\cos\theta \right) \\ \frac{q\cos\theta}{\sqrt{2gH^3/2}} &= \frac{h}{H}\cos\theta \left(1 - \frac{h}{H}\cos\theta \right)\end{aligned}\quad (\text{A1.10})$$

Si se grafica $q\cos\theta/(2gH^3)^{1/2}$ en función de $(h/H)\cos\theta$ —como se muestra en la Figura A1.2—se obtiene el máximo valor de q cuando:

Figura A1.2. Gráfica de la ecuación (A1.10).

$$\frac{h}{H}\cos\theta = \frac{2}{3} \qquad \frac{q\cos\theta}{\sqrt{2gH^3/2}} = 0.3849$$

Si se considera que la distribución de presiones es hidrostática y que el calado al inicio de la reja es proporcional al calado crítico, se tiene:

$$\begin{aligned}h_0 &= k_f h_c & h_c &= \frac{2}{3} H_0 \\ h_0 &= k_f \left(\frac{2}{3} H_0 \right) & h_c &= \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \rightarrow q^2 = h_c^3 g \\ H_0 &= h_0 \cos\theta + \frac{q^2}{2gh_0^2} \rightarrow \frac{3}{2} h_c = k_f h_c \cos\theta + \frac{h_c^3 g}{2gk_f^2 h_c^2} \\ 2\cos\theta k_f^3 - 3k_f^2 + 1 &= 0\end{aligned}\quad (\text{A1.11})$$

Los valores del parámetro k_f en función del ángulo de inclinación de la reja, se presentan en la Tabla A1.1.

Tabla A1.1. Valores de k_f en función del ángulo de inclinación de la reja según Frank (1956).

θ	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°
k_f	1.000	0.980	0.961	0.944	0.927	0.910	0.894
θ	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°
k_f	0.879	0.865	0.851	0.837	0.825	0.812	0.800

Para estimar el valor de la longitud de la reja, Frank (1956) asume que el perfil de la lámina de agua se asemeja a una elipse como se muestra en la Figura A1.3.

Figura A1.3. Perfil de la lámina de agua según Frank (1956).

$$\frac{\bar{s}^2}{L^2} + \frac{(h - h_0)^2}{h_0^2} = 1 \rightarrow \bar{s}^2 h_0^2 + L^2 (h - h_0)^2 = h_0^2 L^2 \quad (1.24)$$

$$\bar{s} = L \sqrt{2 \frac{h}{h_0} - \frac{h^2}{h_0^2}} \quad (A1.12)$$

$$\frac{h}{h_0} = y \rightarrow \bar{s} = L \sqrt{2y - y^2} \rightarrow \bar{s} = L \sqrt{y(2 - y)}$$

$$\frac{d\bar{s}}{dy} = L \frac{1 - y}{\sqrt{y(2 - y)}} \quad (A1.13)$$

Para calcular el caudal que se deriva por la reja, Frank (1956) considera la ecuación del orificio:

$$q = m C_{q0} \cos \theta \sqrt{2gh \cos \theta} \rightarrow q = \lambda \sqrt{h} \quad (A1.14)$$

$$\lambda = \sqrt{2g} m C_{q0} \cos^{3/2} \theta \quad (1.26)$$

Se utiliza la expresión: $h = (h_0 y)$, se deriva el caudal con respecto a $\bar{s}$ y se realiza la integral entre 0 y L.

$$q = \lambda \sqrt{h_0 y} \rightarrow dq = (\lambda \sqrt{h_0 y}) d\bar{s}$$

$$q_1 = \int_0^L dq = \lambda \sqrt{h_0} \int_0^L \sqrt{y} d\bar{s} = \lambda \sqrt{h_0} \int_0^L \sqrt{y} L \frac{1 - y}{\sqrt{y(2 - y)}} dy = \lambda \sqrt{h_0} L \int_0^L \frac{1 - y}{\sqrt{2 - y}} dy$$

Se realiza integración por partes:

$$q_1 = \lambda \sqrt{h_0} L \int_0^L (1 - y)(2 - y)^{1/2} dy = -2\lambda \sqrt{h_0} L \int_0^L (1 - y) d(\sqrt{2 - y})$$

$$q_1 = -2\lambda \sqrt{h_0} L \left[(1 - y)\sqrt{2 - y} - \int_0^L (2 - y)^{1/2} (-dy) \right] = -2\lambda \sqrt{h_0} L \left[(1 - y)\sqrt{2 - y} - \frac{(2 - y)^{3/2}}{\frac{3}{2}} \right]_0^L$$

$$q_1 = -2\lambda\sqrt{h_0}L \left[(1-y)\sqrt{2-y} - \frac{2}{3}(2-y)^{3/2} \right]_0^1 = \frac{2}{3}(2-\sqrt{2})\lambda\sqrt{h_0}L = 0.3905\lambda L\sqrt{h_0}$$

$$L = 2.5607 \frac{q_1}{\lambda\sqrt{h_0}} \quad (1.25)$$

Por otro lado, si se consideran las coordenadas del arco de elipse que conforman el perfil de flujo y las ecuaciones de la elipse:

$$x = \frac{\bar{s}}{L} \quad y = \frac{h}{h_0} \quad (1.23)$$

$$x^2 = 2y - y^2 \quad y = 1 - \sqrt{1 - x^2}$$

$$q_u = q_1 - \lambda\sqrt{h_0}L \int_0^L \frac{1-y}{\sqrt{2-y}} dy = q_1 - \frac{4}{3}\lambda\sqrt{h_0}L + \frac{2}{3}\lambda\sqrt{h_0}L(1+y_u)(2-y_u)^{1/2}$$

$$\frac{q_u}{q_1} = 1.7071(1+y_u)\sqrt{2-y_u} - 2.4142$$

Reemplazando:

$$y_u = 1 - \sqrt{1 - x_u^2} \quad (A1.15)$$

$$\frac{q_u}{q_1} = 1.7071 \left(2 - \sqrt{1 - x_u^2} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 - x_u^2}} - 2.4142 \quad (A1.16)$$

La representación gráfica de las ecuaciones (A1.15) y (A1.16) se puede observar en la Figura A1.4.

Figura A1.4. Representación gráfica de las ecuaciones (A1.15) y (A1.16).

A1.3. NOSEDA (1956a)

Tomando como base los trabajos realizados por Garot (1939) y De Marchi (1947), Nosedá (1956a) obtiene una solución analítica similar a la de Garot, a partir de la ecuación (1.4):

$$H = h \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \rightarrow H = h + \frac{q^2}{2gh^2} \quad (1.4)$$

$$\Phi \left[\frac{h}{H} \right] = \frac{1}{2} \arcsen \sqrt{\frac{h}{H} - \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h}{H} \left(1 - \frac{h}{H} \right)}} \quad (1.30)$$

$$L = \frac{H}{mC_{qh}} \left(\Phi \left[\frac{h_2}{H} \right] - \Phi \left[\frac{h_1}{H} \right] \right) \quad (1.29)$$

Para resolver la ecuación (1.28) se consideran los siguientes cambios de variables:

$$\begin{aligned} u &= \frac{q}{q_{\max}} \\ q_{\max} &= \frac{2}{3\sqrt{3}} H_0 \sqrt{2gH_0} \\ \theta_{\text{subcrítico}} &= \frac{1}{3} \arccos(1 - 2u^2) \\ \theta_{\text{supercrítico}} &= \frac{1}{3} \arccos(1 - 2u^2) + 240^\circ \end{aligned} \quad (A1.17)$$

Con estas consideraciones se obtiene el valor de h/H con la que se modifica la función $\Phi[h/H]$ en una función equivalente $\beta(u)$ que, a su vez, modifica la expresión del cálculo de la longitud de la reja, como sigue:

$$\beta(u) = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{2\cos\theta + 1} \right) - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(2\cos\theta + 1)(1 - \cos\theta)} \quad (A1.18)$$

$$L = x_2 - x_1 = \frac{H_0}{mC_{qh}} (\beta(u_2) - \beta(u_1)) \quad (A1.19)$$

Las expresiones $\Phi(y)$ y $\beta(u)$ para régimen de flujo subcrítico y supercrítico se representan en la Figura A1.5. Estas gráficas se obtienen considerando que el calado al inicio de la reja es igual al calado crítico y también que se deriva todo el caudal de aproximación.

Para el flujo en régimen subcrítico, en la Figura A1.5b se observa que existe una tendencia rectilínea en el tramo MN en un rango de caudal de u entre 0.00 y 0.80; por lo que Nosedá propone un ajuste lineal de $\beta(u)$:

$$\beta(u) = -0.3994 u \quad (A1.20)$$

Con lo que la longitud de la reja se expresaría:

$$L = 0.3994 \frac{H_0}{mC_{qh}} (u_1 - u_2) \quad (\text{A1.21})$$

Figura A1.5. Representación gráfica de las curvas de perfil de flujo y distribución de caudal.

Para valores de u en el rango entre 0.88 y 1.00, se puede considerar la expresión del perfil de flujo (Figura A1.5a):

$$\Phi\left[\frac{h}{H}\right] = -1.016 \sqrt{\frac{h}{H_0} \left(1 - \frac{h}{H_0}\right)} \quad (\text{A1.22})$$

$$L = 1.016 \frac{H_0}{mC_{qh}} \left[\frac{h_1}{H_0} \sqrt{1 - \frac{h_1}{H_0}} - \frac{h_2}{H_0} \sqrt{1 - \frac{h_2}{H_0}} \right] \quad (\text{A1.23})$$

Para el flujo en régimen supercrítico, en la Figura A1.5 se observa que cuando en la curva de caudal $u = 1.0$ y en la curva del perfil de flujo, $y = 2/3$, las funciones $\Phi(y)$ y $\beta(u)$ adquieren el valor de -0.3994; mientras que cuando $y = 0.0$, y $u = 0.0$, las funciones $\Phi(y)$ y $\beta(u)$ toman el valor de 0.7854 ($\pi/4$).

Finalmente, Nosedá, propone dos expresiones para el cálculo de la longitud de la reja considerando el régimen de flujo sobre la reja:

Para flujo subcrítico:
$$L = 0.3994 \frac{H_0}{C_{qh} m} \quad (1.31)$$

Para flujo supercrítico:
$$L = 1.1848 \frac{H_0}{C_{qh} m} \quad (1.32)$$

A1.4. FRANK (1959)

En su trabajo de 1959, Frank, compara su propuesta para el cálculo de la longitud de la reja que se recoge en la ecuación (1.25) con la propuesta por Nosedá (1956a) —para flujo supercrítico— que se presenta en la ecuación (1.32).

$$L = 1.1848 \frac{H_0}{C_{qh} m} \quad (1.32)$$

Para realizar la comparación se asume:

$$\begin{aligned} H_0 &= H_{min} \\ q_1 &= q_{m\acute{a}x} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{2g} (H_{min})^{3/2} \\ h_o &= \left(\frac{2}{3} H_{min} \right) k_f \\ \lambda &= m C_{qh} \sqrt{2g \cos \theta} \end{aligned}$$

Si se conoce que:

$$L_F = 2.5607 \frac{q_1}{\lambda \sqrt{h_o}} \quad (1.25)$$

$$\begin{aligned} \lambda \sqrt{h_o} &= m C_{q0} \sqrt{2g \cos \theta} \sqrt{\frac{2}{3} H_{min} k_f} = m C_{q0} \sqrt{\frac{2}{3} g H_{min}} \sqrt{2k_f \cos \theta} \\ L_F &= 2.5607 \frac{\frac{2}{3} H_{min} \sqrt{\frac{2}{3} g H_{min}}}{m C_{q0} \sqrt{\frac{2}{3} g H_{min}} \sqrt{2k_f \cos \theta}} = 1.2071 \frac{H_{min}}{\sqrt{k_f \cos \theta}} \end{aligned} \quad (A1.24)$$

$$\frac{L_F}{L_N} = \frac{1.2071 \frac{H_{min}}{\sqrt{k_f \cos \theta}}}{1.1848 \frac{H_{min}}{m C_{qh}}} = \frac{1.0194}{\sqrt{k_f \cos \theta}} \quad (1.41)$$

Los valores de la relación L_F/L_N en función del ángulo de inclinación de la reja, se presentan en la Tabla A1.2.

Tabla A1.2. Valores de L_F/L_N en función del ángulo de inclinación de la reja según Frank (1959).

θ	0°	4°	8°	12°	16°	20°
L_F/L_N	1.019	1.042	1.064	1.090	1.119	1.150

Para el cálculo del caudal, Frank (1956) considera que el coeficiente de descarga es constante a lo largo de toda la reja —y coincide con el coeficiente de descarga estático—. Por otro lado, Nosedá (1956b), propone un coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja para barras tipo T, que se recoge en la ecuación (1.34):

$$C_{qh}(h) = 0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.13} \quad (1.34)$$

Donde l es la longitud del interejo (suma del ancho de la barra y el espacio entre barras). Si se toma la ecuación de cálculo de caudal propuesta por Frank (1956) —ecuación (A1.14)— y se emplea la expresión de coeficiente de descarga variable de Nosedá (1956b), se tiene:

$$q_1 = m \left[0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.13} \right] \sqrt{2gh \cos \theta}$$

Como: $h = yh_0$

$$q_1 = 0.66m^{0.84} l^{0.13} y^{-0.13} h_0^{-0.13} y^{1/2} h_0^{1/2} \sqrt{2g \cos \theta} = 0.66m^{-0.84} l^{0.13} y^{0.37} h_0^{0.37} \sqrt{2g \cos \theta}$$

$$r = 0.66m^{0.84} l^{0.13} h_0^{0.37} \sqrt{2g \cos \theta}$$

$$q_1 = ry^{0.37}$$

De las ecuaciones de la elipse se tiene:

$$x = \frac{\bar{s}}{L} \quad y = \frac{h}{h_0} \quad (1.23)$$

$$x^2 = 2y - y^2 \quad y = 1 - \sqrt{1 - x^2}$$

$$q_1 = ry^{0.37} = r \left(1 - \sqrt{1 - x^2} \right)^{0.37} \quad (A1.25)$$

El caudal que puede captarse en un tramo de reja se expresaría como:

$$dq = r \left(1 - \sqrt{1 - x^2} \right)^{0.37} dxL \quad (A1.26)$$

Si se integra la ecuación a lo largo de toda la reja, se tiene:

$$q_1 = rL \int_0^1 \left(1 - \sqrt{1 - x^2} \right)^{0.37} dx = 0.476 rL$$

Partiendo de la ecuación (1.25) se puede expresar el caudal como:

$$q_1 = 0.3905 \lambda L \sqrt{h_0}$$

Se puede, entonces, encontrar el valor de λ como sigue:

$$q_1 = 0.3905 \lambda L \sqrt{h_0} = 0.476 rL$$

$$0.3905 (m C_{qh} \sqrt{2g \cos \theta}) L \sqrt{h_0} = 0.476 \left(0.66m^{0.84} l^{0.13} h_0^{0.37} \sqrt{2g \cos \theta} \right) L$$

$$C_{qh} = 1.219 \left(0.66 \frac{m^{0.84} l^{0.13} h_0^{0.37}}{m h_0^{1/2}} \right) = 1.219 m^{-0.16} \left(\frac{l}{h_0} \right)^{0.13}$$

$$C_{qh} = 1.22 C_{qh(Nosedá)} \quad (1.42)$$

A1.5. KROCHIN (1978)

Basándose en los experimentos realizados por Melik Nubarow en rejas con barras longitudinales al flujo; y considerando que la distribución de presiones no coincide con la presión hidrostática, propone el cálculo de la velocidad de entrada a la reja a través de sus dos componentes:

$$V_v = \sqrt{2g \left(\frac{p_{hendidura}}{\gamma} \right)} \quad V_h = \sqrt{2g \left(\frac{p_{hendidura}}{\gamma} \right) H_0} \quad (A1.27)$$

$$V = \sqrt{V_v^2 + V_h^2} = \sqrt{2gH_0}$$

La velocidad, V , forma un ángulo con la vertical que se estima como:

$$\beta = \arctg \frac{V_h}{V_v} \quad (A1.28)$$

Adicionalmente, si se considera las expresiones del área de la reja por la cual entra el agua hacia la galería de captación y del coeficiente k que reduce el área total en área efectiva disponible de la reja (introduce el efecto de obstrucción), se tiene el caudal que ingresa por una longitud x de reja como se presenta en la ecuación (A1.30):

$$A = B L \cos(\beta_{med}) k \quad (A1.29)$$

$$k = (1 - f)m \quad (1.48)$$

$$q = C_{qH} x \cos(\beta_{med}) k \sqrt{2gH_0} \quad (A1.30)$$

Si la cantidad de caudal derivado es igual al caudal de aproximación, la longitud x de la reja sería igual a L y se puede utilizar la expresión experimental de Zamarin recogida por Krochin:

$$q = C_{qH} L k \sqrt{2gh_{med}} \quad (A1.31)$$

Zamarin incluye el término h_{med} que representa la altura media de agua sobre la reja que puede estimarse considerando que el calado al inicio de la reja coincide con el calado crítico y que el calado al final es igual a cero:

$$h_{med} = \frac{h_c + 0}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3} H_0 \right) = \frac{H_0}{3} \quad (A1.32)$$

Si se igualan la expresión propuesta por Krochin y aquella propuesta por Zamarin, considerando la longitud L , se tiene:

$$C_{qH} L \cos(\beta_{med}) k \sqrt{2gH_0} = C_{qH} L k \sqrt{2g \frac{H_0}{3}}$$

$$\beta_{med} = \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.577 \quad \rightarrow \quad \beta = 54^{\circ}46' \quad (A1.33)$$

Experimentalmente se habían registrado valores entre 45° y 53° .

Si se utiliza el valor de β calculado con (A1.33), la ecuación (A1.30) quedaría:

$$q = C_{qH} L \cos(0.577) k \sqrt{2g} \sqrt{H_0} = 2.55 C_{qH} L k \sqrt{H_0}$$

Finalmente, considerando la relación entre H_0 y el calado crítico:

$$q = 2.55 C_{qH} L k \sqrt{\frac{3q^{2/3}}{2g^{1/3}}} \quad \rightarrow \quad L = \frac{(0.313q)^{2/3}}{C_{qH} k} \quad (1.47)$$

APÉNDICE II

RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN

A lo largo de la tesis se utiliza la ecuación (1.71), para determinar el perfil que describe la lámina de agua, y para estimar el valor de la longitud L_1 del flujo sobre la reja. Para resolver esta ecuación diferencial ordinaria de primer orden, se ha utilizado el método de Runge-Kutta de cuarto orden (García, 2016; Schlömilch y Witzschel, 1901).

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}\sqrt{(H_0 + x\text{sen}\theta)(H_0 + x\text{sen}\theta - h\cos\theta)} + h\text{sen}\theta}{3h\cos\theta - 2(H_0 + x\text{sen}\theta)} \quad (1.71)$$

Si expresamos una ecuación diferencial ordinaria de primer orden, con una condición inicial de la forma:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= f(x, y) \\ y(x_o) &= y_o \end{aligned} \quad (A2.1)$$

Donde: x_o, y_o son las coordenadas del punto inicial.

Si se elige un paso de cálculo Δx , se tiene:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x \quad (A2.2)$$

El desarrollo en serie de Taylor de la ecuación diferencial se puede expresar de la forma:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta x f_i(x, y) + \frac{\Delta x^2}{2!} f_i'(x, y) + \frac{\Delta x^3}{3!} f_i''(x, y) + \frac{\Delta x^4}{4!} f_i'''(x, y) + O(h^5) \quad (A2.3)$$

C. Runge y M. W. Kutta (García, 2016; Schlömilch y Witzschel, 1901) proponen una solución de la ecuación del tipo:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta x \sum_{i=1}^4 a_i k_i + O(h^5) \quad (A2.4)$$

$$k_i = f\left(x_i + \chi_i \Delta x, y_i + \Delta x \sum_{j=1}^4 \vartheta_{ij} k_j\right) \quad (A2.5)$$

Donde a_i son los coeficientes de cada una de las funciones k_i ; k_i representan los valores de la función $f(x, y)$ en varios puntos dentro del intervalo $(x_i, x_i + \Delta x)$ que se utilizan para aproximar la solución. Estos puntos son el inicio y el final del intervalo; así como varios en

el interior de éste, como se recoge en los valores adoptados por las constantes χ y ϑ que se presentan en la tabla xx.

Tabla A2.1 Valores adoptados por los coeficientes χ_i y ϑ_{ij} .

χ_i	ϑ_{ij}
$\chi_1 = 0.0$	$\vartheta_{21} = 1/2$
$\chi_2 = 1/2$	$\vartheta_{32} = 1/2$
$\chi_3 = 1/2$	$\vartheta_{43} = 1.0$
$\chi_4 = 1.0$	

Sustituyendo la ecuación (A2.5) en la ecuación (A2.4) e igualando con la ecuación (A2.3), se obtienen los valores de los coeficientes a_i , de tal forma que la ecuación (A2.4) queda expresada de la siguiente manera:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}\Delta x(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (\text{A2.6})$$

Donde:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}\Delta x k_1\right) \\ k_3 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}\Delta x k_2\right) \\ k_4 &= f(x_i + \Delta x, y_i + \Delta x k_3) \end{aligned} \quad (\text{A2.7})$$

El método de Runge-Kutta de cuarto orden presenta un error por paso del orden de $O(\Delta x^5)$; mientras que el error total acumulado tiene el orden $O(\Delta x^4)$.

APÉNDICE III

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN - DISREJA

A3.1. DISREJA INTRO

```
% --- Executes just before DISREJA_INTRO is made visible.
function DISREJA_INTRO_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% Choose default command line output for DISREJA_INTRO
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes DISREJA_INTRO wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

%Center the interface
set( handles.output,'Units','pixels' );
screenSize = get(0, 'ScreenSize');
position = get( handles.output,'Position');
position(1) = (screenSize(3)-position(3))/2;
position(2) = (screenSize(4)-position(4))/2;
set( handles.output,'Position', position );

%Universities Logos
axes(handles.Logo_UPCT)
background=imread('Logo_UPCT.jpg');
image(background);
axis off

axes(handles.Logo_EPN)
background=imread('Logo_EPN.jpg');
image(background);
axis off

% --- Executes on button press in Dis_sedim_pushbutton.
function Dis_sedim_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
vpop1=get(handles.Language_popupmenu,'Value');
switch vpop1
    case 2
        clear all
        close all
        clc
        DISREJA_SEDIMENTS
        %DISREJA_SEDIMENTS is the name of the following program
    case 3
        clear all
        close all
        clc
        DISREJA_SEDIMENTOS
        %DISREJA_SEDIMENTOS es el nombre del siguiente programa
end

% --- Executes on button press in acerca_pushbutton.
function acerca_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
vpop1=get(handles.Language_popupmenu,'Value');
switch vpop1
    case 2
        msgbox('The following program is based on design recommendations made by
Orth et al. (1954), Krochin (1978), Drobir (1981), Drobir et al. (1999) and the
research developed at the Hydraulic Laboratory of the Universidad Politécnica de
Cartagena, UPCT, (using bottom racks with T-shape bars and circular bars) from
```

```

2010 to the present date under the direction of Dr. Luis Castillo Elsitdié. -
July, 2019.', 'About');
    case 3
        msgbox('El siguiente programa está basado en recomendaciones de diseño
realizadas por Orth et al. (1954), Krochin (1978), Drobir (1981), Drobir et al.
(1999), y en las investigaciones desarrolladas en el Laboratorio de Hidráulica de
la Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT, (con rejillas de barras tipo T y
circulares) desde 2010 hasta la presente fecha bajo la dirección del Dr. Luis
Castillo Elsitdié. - Julio, 2019.', 'Acerca_de');
    end

% --- Executes on button press in salir_pushbutton.
function salir_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
vpop1=get(handles.Language_popupmenu, 'Value');
switch vpop1
    case 1
        salir=questdlg('Do you want to exit the
program?', 'Exit', 'Yes', 'No', 'No');
        switch salir
            case 'Yes'
                close
            case 'No'
                return;
        end
    case 2
        salir=questdlg('Do you want to exit the
program?', 'Exit', 'Yes', 'No', 'No');
        switch salir
            case 'Yes'
                close
            case 'No'
                return;
        end
    case 3
        salir=questdlg('¿Desea salir del programa?', 'Salida del
Programa', 'Si', 'No', 'No');
        switch salir
            case 'Si'
                close
            case 'No'
                return;
        end
end

% --- Executes on button press in dis_agua_clara_pushbutton.
function dis_agua_clara_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
vpop1=get(handles.Language_popupmenu, 'Value');
switch vpop1
    case 2
        clear all
        close all
        clc
        DISREJA_CLEAR
        %DISREJA_CLEAR is the name of the other program
    case 3
        clear all
        close all
        clc
        DISREJA_CLARA
        %DISREJA_CLARA es el nombre del siguiente programa
end

% --- Executes on selection change in Language_popupmenu.
function Language_popupmenu_Callback(hObject, eventdata, handles)
vpop1=get(handles.Language_popupmenu, 'Value');
switch vpop1

```

```

case 2
    set(handles.Programa_txt,'Visible','off');
    set(handles.Programa_eng_txt,'Visible','on');
    set(handles.acerca_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.dis_agua_clara_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.Dis_sedim_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.salir_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.idioma_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.Users_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.Manual_pushbutton,'Visible','off');

    set(handles.Programa_eng_txt,'String','BOTTOM RACK DIMENSIONS DESIGN');
    set(handles.acerca_pushbutton,'String','ABOUT');
    set(handles.dis_agua_clara_pushbutton,'String','DESIGN WITH CLEAR
WATER');
    set(handles.Dis_sedim_pushbutton,'String','DESIGN WITH SEDIMENTS');
    set(handles.salir_pushbutton,'String','EXIT');
    set(handles.idioma_pushbutton,'String','LANGUAGE');
    set(handles.Language_popupmenu,'Visible','off')
case 3
    set(handles.Programa_eng_txt,'Visible','off');
    set(handles.Programa_txt,'Visible','on');
    set(handles.acerca_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.dis_agua_clara_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.Dis_sedim_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.salir_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.idioma_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.Manual_pushbutton,'Visible','on');
    set(handles.Users_pushbutton,'Visible','off');

    set(handles.Programa_txt,'String','DISEÑO DE LAS DIMENSIONES DE UNA REJA
DE FONDO');
    set(handles.acerca_pushbutton,'String','ACERCA DE');
    set(handles.dis_agua_clara_pushbutton,'String','DISEÑO CON AGUA CLARA');
    set(handles.Dis_sedim_pushbutton,'String','DISEÑO CON SEDIMENTOS');
    set(handles.salir_pushbutton,'String','SALIR');
    set(handles.idioma_pushbutton,'String','IDIOMA');
    set(handles.Language_popupmenu,'Visible','off')
end

% --- Executes on button press in idioma_pushbutton.
function idioma_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.Language_popupmenu,'Visible','on');

% --- Executes on button press in Users_pushbutton.
function Users_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
options_doc_nocode.format = 'pdf';
options_doc_nocode.showCode = false;
publish('Users_Guide.m',options_doc_nocode);
winopen('html/Users_Guide.pdf')

% --- Executes on button press in Manual_pushbutton.
function Manual_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
options_doc_nocode.format = 'pdf';
options_doc_nocode.showCode = false;
publish('Manual_Usuario.m',options_doc_nocode);
winopen('html/Manual_Usuario.pdf')

```

A3.2. DISREJA SEDIMENTOS

En este apartado se coloca la programación del diseño considerando arrastre de sedimentos, porque de cierta manera engloba también la programación con agua clara.

```
% --- Executes just before DISREJA_SEDIMENTOS is made visible.
function DISREJA_SEDIMENTOS_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% Choose default command line output for DISREJA_SEDIMENTOS
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes DISREJA_SEDIMENTOS wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.GUI1);

%Centrar interfaz en pantalla
set( handles.output, 'Units', 'pixels' );
screenSize = get(0, 'ScreenSize');
position = get( handles.output, 'Position' );
position(1) = (screenSize(3)-position(3))/2;
position(2) = (screenSize(4)-position(4))/2;
set( handles.output, 'Position', position );

axes(handles.corte_esquema)
background=imread('Corte_esq_Lf6.png');
image(background);
axis off

axes(handles.planta_esquema)
background=imread('Planta_Lf1.jpg');
image(background);
axis off

axes(handles.m_axes)
background=imread('Esquema_reja Lf.jpg');
image(background);
axis off

axes(handles.Tipo_reja_axes)
axis off

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = DISREJA_SEDIMENTOS_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on selection change in Tipo_barra_popup.
function Tipo_barra_popup_Callback(hObject, eventdata, handles)
vpop1=get(handles.Tipo_barra_popup, 'Value');
switch vpop1
    case 1
        cla(handles.Tipo_reja_axes, 'reset');
        axes(handles.Tipo_reja_axes)
        axis off
        helpdlg('Seleccione el tipo de barra', 'Tipo de Barra');
    case 2
        %Barra tipo T
        axes(handles.Tipo_reja_axes)
        x1=[0.2 0.2 0.2 0.04 0.04 0.04 0.04 0.46 0.46 0.46 0.46 0.3 0.3 0.3 0.3
0.2];
        y1=[0.1 0.7 0.7 0.7 0.7 0.8 0.8 0.8 0.8 0.7 0.7 0.7 0.7 0.1 0.1 0.1];
        x2=[0.7 0.7 0.7 0.54 0.54 0.54 0.96 0.96 0.96 0.96 0.8 0.8 0.8 0.8
0.7];
        plot(x1,y1, 'k-');
        hold on
        plot(x2,y1, 'k-');
        hold off
        axis off
    otherwise
        %Barra circular
        axes(handles.Tipo_reja_axes)
```

```

        x1=[0.250 0.312 0.337 0.355 0.370 0.382 0.423 0.444 0.450 0.444 0.423
0.382 0.370 0.355 0.337 0.312 0.250 0.188 0.163 0.145 0.130 0.118 0.077 0.056
0.050 0.056 0.077 0.118 0.130 0.145 0.163 0.188 0.250];
        y1=[0.300 0.310 0.320 0.330 0.340 0.350 0.400 0.450 0.500 0.550 0.600
0.650 0.660 0.670 0.680 0.690 0.700 0.690 0.680 0.670 0.660 0.650 0.600 0.550
0.500 0.450 0.400 0.350 0.340 0.330 0.320 0.310 0.300];
        x2=x1+0.5;
        x3=x1+1;
        plot(x1,y1,'k-');
        hold on
        plot(x2,y1,'k-');
        plot(x3,y1,'k-');
        axis([0 1.5 0 1]);
        hold off
        axis off
        warndlg('Este tipo de barra no es recomendable para utilizar cuando se
considera transporte de sedimentos porque se obstruye con mayor
facilidad.','Advertencia');
    end
    guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in Calcular_pushbutton.
function Calcular_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Definición de variables
Qd=str2double(get(handles.Qd_edit,'String'));
Qmax=str2double(get(handles.Qmax_edit,'String'));
B=str2double(get(handles.B_edit,'String'));
tgq=str2double(get(handles.tg_edit,'String'))/100;
b1=str2double(get(handles.b1_edit,'String'));
bw=str2double(get(handles.bw_edit,'String'));

setappdata(0,'Qdvalue',Qd);
setappdata(0,'Bvalue',B);
setappdata(0,'tgqvalue',tgq);
setappdata(0,'b1value',b1);
setappdata(0,'bwvalue',bw);

if isnan(Qd) || isnan(B) || isnan(tgq) || isnan(b1) || isnan(bw)
    Datos0=1;
else
    Datos0=0;
end

vpop12=get(handles.Tipo_barra_popup,'Value');
setappdata(0,'Tipovalue',vpop12);

if Datos0==1
    if vpop12==1
        errordlg('Seleccione el tipo de barra y verifique que todos los campos se
encuentran llenos','Error');
    else
        errordlg('Verifique que todos los campos se encuentran llenos','Error');
    end
elseif vpop12==1
    errordlg('Seleccione el tipo de barra','Error');
else
    set(handles.Comparar_pushbutton,'Enable','on');
    set(handles.Figuras_pushbutton,'Enable','on');
    set(handles.Calcular_pushbutton,'Enable','off');

%Definición de constantes: aceleración de la gravedad: 9.81 m/s2
g=9.81;

%Cálculo del índice de huecos
m=b1/(b1+bw);

```



```
m1=num2str(m, '%.2f');
set(handles.void_resp, 'String', m1);
setappdata(0, 'mvalue', m);

%Cálculo de los parámetros hidráulicos del río
q=Qd/B;
q1=num2str(q, '%.2f');
set(handles.q_resp, 'String', q1);
setappdata(0, 'qvalue', q);
hc=(q^2/g)^(1/3);
hc1=num2str(hc, '%.2f');
set(handles.hc_resp, 'String', hc1);
setappdata(0, 'hcvalue', hc);
Hmin=3/2*hc;
Hmin1=num2str(Hmin, '%.2f');
set(handles.Hmin_resp, 'String', Hmin1);
setappdata(0, 'Hminvalue', Hmin);

%Cálculo del coeficiente de descarga promedio, la longitud mojada y
%final

%Definición de parámetros a y b para cálculo del coeficiente de
%descarga promedio
%a
a=0.37*m^(-1.151);
%b
if m<=0.28
    b=0.05;
elseif m<=0.313
    b=2.195*m-0.5646;
elseif m<0.60
    b=0.27*m+0.0378;
else
    b=0.2;
end

%vpop12 es la variable que señala el tipo de reja seleccionado
switch vpop12
    case 2
        %García et al. (2018a) Tipo T
        if m<0.28
            Cqo=0.901*exp(-0.771*m);
            CqHprom=(a*Cqo*m)/(1+tgq)*(q^b);
            Lm=q/(CqHprom*m*sqrt(2*g*Hmin));
        else
            Cqo1=0.901*exp(-0.771*m);
            CqH1=(a*Cqo1*m)/(1+tgq)*(q^b);
            L1=q/(CqH1*m*sqrt(2*g*Hmin));

            Cqo2=0.901*exp(-0.771*0.28);
            CqH2=(a*Cqo2*0.28)/(1+tgq)*(q^0.05);
            L2=q/(CqH2*0.28*sqrt(2*g*Hmin));

            if L1<L2
                CqHprom=CqH1;
                Lm=L1;
            else
                CqHprom=CqH2;
                Lm=L2;
            end
        end
    end

    setappdata(0, 'CqHpromvalue', CqHprom);
    CqHprom1=num2str(CqHprom, '%.3f');
    set(handles.CqH_resp, 'String', CqHprom1);
    Lm1=num2str(Lm, '%.2f');
```

```

set(handles.Lm_resp, 'String', Lm1);
setappdata(0, 'Lmvalue', Lm);
f=1.40;
f1=num2str(f, '%.2f');
set(handles.f_resp, 'String', f1);
setappdata(0, 'fvalue', f);
Lf=f*Lm;
Lf1=round(Lf, 1);
Lf2=num2str(Lf1, '%.2f');
set(handles.Lf_resp, 'String', Lf2);
setappdata(0, 'Lfvalue', Lf);

case 3
    %García et al. (2018a)
    if m<0.28
        Cqo=1.4287*exp(-0.771*m);
        CqHprom=(a*Cqo*m)/(1+tgq)*(q^b);
        setappdata(0, 'CqHpromvalue', CqHprom);
        CqHprom1=num2str(CqHprom, '%.3f');
        set(handles.CqH_resp, 'String', CqHprom1);
        Lm=q/(CqHprom*m*sqrt(2*g*Hmin));
        Lm1=round(Lm, 1);
        Lm2=num2str(Lm1, '%.2f');
        set(handles.Lm_resp, 'String', Lm2);
        setappdata(0, 'Lmvalue', Lm);
    else
        Cqo1=1.4287*exp(-0.771*m);
        CqH1=(a*Cqo1*m)/(1+tgq)*(q^b);
        L1=q/(CqH1*m*sqrt(2*g*Hmin));

        Cqo2=1.4287*exp(-0.771*0.28);
        CqH2=(a*Cqo2*0.28)/(1+tgq)*(q^0.05);
        L2=q/(CqH2*0.28*sqrt(2*g*Hmin));

        if L1<L2
            CqHprom=CqH1;
            Lm=L1;
        else
            CqHprom=CqH2;
            Lm=L2;
        end
    end

    setappdata(0, 'CqHpromvalue', CqHprom);
    CqHprom1=num2str(CqHprom, '%.3f');
    set(handles.CqH_resp, 'String', CqHprom1);
    Lm1=num2str(Lm, '%.2f');
    set(handles.Lm_resp, 'String', Lm1);
    setappdata(0, 'Lmvalue', Lm);
    f=3.50;
    f1=num2str(f, '%.2f');
    set(handles.f_resp, 'String', f1);
    setappdata(0, 'fvalue', f);
    Lf=f*Lm;
    Lf1=round(Lf, 1);
    Lf2=num2str(Lf1, '%.2f');
    set(handles.Lf_resp, 'String', Lf2);
    setappdata(0, 'Lfvalue', Lf);
end
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Comparar_pushbutton.
function Comparar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA
%DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA es el nombre de la ventana para comparaciones

```

```
% --- Executes on button press in Salir_pushbutton.
function Salir_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
salir=questdlg('¿Desea salir del programa?', 'Salida del
Programa', 'Si', 'No', 'No');
switch salir
    case 'Si'
        close
    case 'No'
        return;
end

% --- Executes on button press in Resumen_pushbutton.
function Resumen_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

En esta sección se coloca la información sobre la metodología de cálculo que se detalla en el Capítulo 7.

```
options_doc_nocode.format = 'doc';
options_doc_nocode.showCode = false;
publish('DISREJA_SEDIMENTOS.m', options_doc_nocode);
winopen('html/DISREJA_SEDIMENTOS.doc');

% --- Executes on button press in Nuevo_pushbutton.
function Nuevo_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Borrar edit text
set(handles.Qd_edit, 'String', '');
set(handles.Qmax_edit, 'String', '');
set(handles.Br_edit, 'String', '');
set(handles.B_edit, 'String', '');
set(handles.tg_edit, 'String', '');
set(handles.bl_edit, 'String', '');
set(handles.bw_edit, 'String', '');

%Borrar static text
set(handles.void_resp, 'String', '');
set(handles.q_resp, 'String', '');
set(handles.hc_resp, 'String', '');
set(handles.Hmin_resp, 'String', '');
set(handles.CqH_resp, 'String', '');
set(handles.Lm_resp, 'String', '');
set(handles.f_resp, 'String', '');
set(handles.Lf_resp, 'String', '');

%Colocar popupmenu en Seleccionar
set(handles.Tipo_barra_popup, 'Value', 1);

%Configurar accesibilidad de pushbutton
set(handles.Comparar_pushbutton, 'Enable', 'off');
set(handles.Figuras_pushbutton, 'Enable', 'off');
set(handles.Calcular_pushbutton, 'Enable', 'on');

% Cerramos las gráficas
axes(handles.Tipo_reja_axes);
cla reset
axis off
axes(handles.corte_esquema);
axis off
axes(handles.planta_esquema);
axis off

% --- Executes on button press in Variar_pushbutton.
function Variar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Borrar static text
set(handles.void_resp, 'String', '');
set(handles.q_resp, 'String', '');
set(handles.hc_resp, 'String', '');
set(handles.Hmin_resp, 'String', '');
```

```

set(handles.CqH_resp, 'String', '');
set(handles.Lm_resp, 'String', '');
set(handles.f_resp, 'String', '');
set(handles.Lf_resp, 'String', '');

%Configurar accesibilidad de pushbutton
set(handles.Comparar_pushbutton, 'Enable', 'off');
set(handles.Figuras_pushbutton, 'Enable', 'off');
set(handles.Calcular_pushbutton, 'Enable', 'on');

% --- Executes on key press with focus on B_edit and none of its controls.
function B_edit_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
Br=str2double(get(handles.Br_edit, 'String'));
B=str2double(get(handles.B_edit, 'String'));
if B>Br
    warndlg('El ancho de la reja seleccionado es mayor que el ancho del río en la
zona de captación', 'Ancho de reja');
    set(handles.B_edit, 'String', '');
end

% --- Executes on button press in Menu_pushbutton.
function Menu_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all
close all
clc
DISREJA_INTRO
%DISREJA_INTRO es el nombre del menu

% --- Executes on button press in Figuras_pushbutton.
function Figuras_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
DISREJA_SEDIMENTOS_FIG
%DISREJA_SEDIMENTOS_FIG es el nombre de la ventana de figuras

```

A3.3. DISREJA FIGURAS

```

% --- Executes just before DISREJA_SEDIMENTOS_FIG is made visible.
function DISREJA_SEDIMENTOS_FIG_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% Choose default command line output for DISREJA_SEDIMENTOS_FIG
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes DISREJA_SEDIMENTOS_FIG wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.GUI1);

%Centrar Interfaz en pantalla
set( handles.output, 'Units', 'pixels' );
screenSize = get(0, 'ScreenSize');
position = get( handles.output, 'Position');
position(1) = (screenSize(3)-position(3))/2;
position(2) = (screenSize(4)-position(4))/2;
set(handles.output, 'Position', position);

axes(handles.perfil);
cla reset
axes(handles.q_acum);
cla reset

%Definición de variables
vpop12=getappdata(0, 'Tipovalue');
tgq=getappdata(0, 'tgqvalue');
m=getappdata(0, 'mvalue');
q=getappdata(0, 'qvalue');

```

```

hc=getappdata(0,'hcvalue');
Hmin=getappdata(0,'Hminvalue');
Lm=getappdata(0,'Lmvalue');
f=getappdata(0,'fvalue');
Lf=getappdata(0,'Lfvalue');

theta=atan(tgq);

%Definición de constantes: aceleración de la gravedad: 9.81 m/s2
g=9.81;

%vpop12 es la variable que señala el tipo de reja seleccionado
switch vpop12
    case 2
        set(handles.Tipobar_txt,'String','Barra Tipo T');
        %García et al. (2018a) Tipo T
        Q=theta;
        hh=0.005; %hh=0.005 m valor de delta x para las gráficas
        nmax=5000; %nmax = número máximo de iteraciones
        ho=0.7*hc;
        mprima=m/f;

        %Discretización espacial - inicialización de variable
        x0g=0;
        xyg(1)=x0g;
        hyg(1)=ho;
        %inicializamos caudal y caudal acumulado
        qqdg(1)=0;
        qqddg(1)=0;
        %cálculo del perfil y caudal acumulado (García, 2016)
        for i=1:nmax
            %CqH=(0.58*exp(-0.75*(x(1)/hc)*m))/(1+0.9*tan(Q));
            CqHg(i)=(0.58*exp(-0.75*(xyg(i)/hc)*mprima))/(1+0.9*tgq);

            % Discretización temporal
            xyg(i+1)=xyg(i)+hh;

            % Método Runge Kutta IV
            k1=(2*mprima*CqHg(i)*sqrt((Hmin+xyg(i)*sin(Q))*(Hmin+xyg(i)*sin(Q)-
            hyg(i)*cos(Q)))+hyg(i)*sin(Q))/(3*hyg(i)*cos(Q)-2*(Hmin+xyg(i)*sin(Q)));

            k2=(2*mprima*CqHg(i)*sqrt((Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q))*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin
            (Q)-
            (hyg(i)+k1*hh/2)*cos(Q)))+(hyg(i)+k1*hh/2)*sin(Q))/(3*(hyg(i)+k1*hh/2)*cos(Q)-
            2*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q)));

            k3=(2*mprima*CqHg(i)*sqrt((Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q))*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin
            (Q)-
            (hyg(i)+k2*hh/2)*cos(Q)))+(hyg(i)+k2*hh/2)*sin(Q))/(3*(hyg(i)+k2*hh/2)*cos(Q)-
            2*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q)));

            k4=(2*mprima*CqHg(i)*sqrt((Hmin+(xyg(i+1)*sin(Q))*(Hmin+xyg(i+1)*sin(Q)-
            (hyg(i)+k3*hh)*cos(Q)))+(hyg(i)+k3*hh)*sin(Q))/(3*(hyg(i)+k3*hh)*cos(Q)-
            2*(Hmin+xyg(i+1)*sin(Q)));
            hyg(i+1)=hyg(i)+hh/6*(k1+2*k2+2*k3+k4);
            hhyg=hyg(i+1);

            %Para gráfico considerando la inclinación de la reja
            xytg(i)=xyg(i);
            hytg(i)=hyg(i)-xytg(i)*tgq;

            %Cálculo de qd
            qdg(i)=CqHg(i)*mprima*hh*sqrt(2*g*(Hmin+xyg(i)*sin(Q)));
            % Cálculo de caudal acumulado
            qqdg(i+1)=qdg(i)+qqdg(i);
            qcontrol=qqdg(i+1);
            % Porcentaje de caudal acumulado
            qqddg(i+1)=qqdg(i+1)/q*100;

```

```

        %Control
        if (hhyg<=10^(-4)) || qcontrol>=0.97*q
            j=i-1;
            qL1=qdgd(i);
            L1=j*hh;
            break;
        end
    end

case 3
    set(handles.Tipobar_txt,'String','Barra Circular');
    %García et al. (2018a)
    CqHprom=getappdata(0,'CqHpromvalue');

    %Para graficar el perfil de flujo y el caudal acumulado
    Q=theta;
    hh=0.005; %hh=0.005 m valor de delta x para las gráficas
    nmax=5000; %nmax = número máximo de iteraciones
    ho=0.9*hc;
    mprima=m/f;

    %Discretización espacial - inicialización de variable
    x0g=0;
    xyg(1)=x0g;
    %dato inicial - inicialización de variable
    hyg(1)=ho;
    %inicializamos caudal y caudal acumulado
    qdgd(1)=0;
    qddgd(1)=0;
    %cálculo del perfil y caudal acumulado (García, 2016)

    for i=1:nmax
        if m<0.4
            CqH(i)=(1-0.15*(1-0.51*(1-0.45*tgq)*(xyg(i)/hc)*mprima)^(-
2.7))/(1+tgq);
        elseif m>=0.59
            if (xyg(i)/hc)*mprima<0.96
                CqH(i)=(1+0.2*tgq)/(1+tgq)*(0.145*(xyg(i)/hc)*mprima+0.50);
            else
                CqH(i)=(1+0.2*tgq)/(1+tgq)*(0.4856*((xyg(i)/hc)*mprima)^(-
6.021));
            end
        else
            CqH(i)=1.558*CqHprom;
        end

        % Discretización temporal
        xyg(i+1)=xyg(i)+hh;

        % Método Runge Kutta IV
        k1=(2*mprima*CqH(i)*sqrt((Hmin+xyg(i)*sin(Q))*(Hmin+xyg(i)*sin(Q)-
hyg(i)*cos(Q)))+hyg(i)*sin(Q))/(3*hyg(i)*cos(Q)-2*(Hmin+xyg(i)*sin(Q)));

        k2=(2*mprima*CqH(i)*sqrt((Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q))*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q)-
hyg(i)+k1*hh/2)*cos(Q)))+(hyg(i)+k1*hh/2)*sin(Q))/(3*(hyg(i)+k1*hh/2)*cos(Q)-
2*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q)));

        k3=(2*mprima*CqH(i)*sqrt((Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q))*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q)-
hyg(i)+k2*hh/2)*cos(Q)))+(hyg(i)+k2*hh/2)*sin(Q))/(3*(hyg(i)+k2*hh/2)*cos(Q)-
2*(Hmin+(xyg(i)+(hh/2))*sin(Q)));

        k4=(2*mprima*CqH(i)*sqrt((Hmin+(xyg(i+1))*sin(Q))*(Hmin+xyg(i+1)*sin(Q)-
hyg(i)+k3*hh)*cos(Q)))+(hyg(i)+k3*hh)*sin(Q))/(3*(hyg(i)+k3*hh)*cos(Q)-
2*(Hmin+xyg(i+1)*sin(Q)));
        hyg(i+1)=hyg(i)+hh/6*(k1+2*k2+2*k3+k4);
        hhyg=hyg(i+1);
    end
end

```

```

%Para gráfico considerando la inclinación de la reja
xytg(i)=xyg(i);
hytg(i)=hyg(i)-xytg(i)*tgq;

%Cálculo de qd
qdg(i)=CqH(i)*mprima*hh*sqrt(2*g*(Hmin+xyg(i)*sin(Q)));
% Cálculo de caudal acumulado
qqdg(i+1)=qdg(i)+qqdg(i);
qcontrol=qqdg(i+1);
% Porcentaje de caudal acumulado
qqddg(i+1)=qqdg(i+1)/q*100;

%Control
if (hhyg<=10^(-4))||qcontrol>=0.97*q
    j=i-1;
    qL1=qqdg(j);
    L1=j*hh;
    break;
end
end

set(handles.Perfil_txt,'Visible','on');
set(handles.Caudal_txt,'Visible','on');

if 0.97*q<qL1
    qL11=0.97*q;
else
    qL11=qL1;
end

%Para rótulo de L1
xtxt=L1*cos(theta);
ytxt=-L1*sin(theta);
strL1=['L_1= ' num2str(L1,'%2f') ' m '];

%Para rótulo de Lf
xLf=Lf*cos(theta);
yLf=-Lf*sin(theta);
Lf1=round(Lf,1);
strLf=['L_f= ' num2str(Lf1,'%2f') ' m'];

%Para graficar la reja
xreja=[0 Lf*cos(theta)];
yreja=[0 -Lf*sin(theta)];

%Para graficar caudal hasta Lf
xqLf=[L1 Lf];
yqLf=[qL1 q];
strqL1=['q= ' num2str(qL1,'%2f') ' m^3/s/m '];
strq=['q= ' num2str(q,'%2f') ' m^3/s/m '];

%Límite vertical superior gráfico perfil
if vpopl2==2
    yLim=(1+tgq)*hc;
else
    yLim=1.2*(1+tgq)*hc;
end

%Para graficar el perfil
axes(handles.perfil);
pc(1)=plot(xytg,hytg,'b-','LineWidth',1.25,'Displayname','Perfil de flujo');
text(xtxt,ytxt,['\downarrow',' '], 'Color','red','FontSize',16,'HorizontalAlignment','left');
text(xtxt,ytxt,['strL1',' ',' ',' '], 'HorizontalAlignment','center');

```

```

text(0,ho,['\leftarrow'],'Color','red','FontSize',16,'HorizontalAlignment','left'
);
text(0,ho,['          ho= ' num2str(ho,'%2f') ' m'],'HorizontalAlignment','left');
hold on
pc(2)=plot(xreja,yreja,'k-','LineWidth',1.5,'Displayname','Reja de fondo');
text(xLf,yLf,['\downarrow','
'],'Color','red','FontSize',16,'HorizontalAlignment','right');
text(1.02*xLf,yLf,[strLf,' ',' ',' ',' ',' '],'HorizontalAlignment','right');
axis([-inf 1.05*xLf (-hc/3+1.05*yLf) yLim]);
xtickformat('%1f');
ytickformat('%2f');
xlabel('x (m)');
ylabel('h (m)');
legend([pc(1) pc(2)],'Location','northeast');

%Para graficar el caudal captado
axes(handles.q_acum);
pq(1)=plot(xyg,qqdg,'b-','Displayname','Caudal derivado');
text(L1,qL1,['\downarrow','
'],'Color','red','FontSize',16,'HorizontalAlignment','center','Rotation',90);
text(L1,qL1,[strqL1],'HorizontalAlignment','right');
text(Lf,q,['\rightarrow'],'Color','red','FontSize',16,'HorizontalAlignment','right',
t','Rotation',-35);
text(Lf,q,[strq,' ',' ',' '],'HorizontalAlignment','right');
hold on
pq(2)=plot(xqLf,yqLf,'b');
axis([0 Lf 0 1.3*q]);
xtickformat('%1f');
ytickformat('%2f');
xlabel('x (m)');
ylabel('q (m^3/s/m)');
legend([pq(1)],'Location','southeast');

set(handles.Exportar_pushbutton,'Enable','on');
set(handles.Guardar_pushbutton,'Enable','on');

handles=guidata(hObject);
handles.xytg=xytg;
handles.hytg=hytg;
handles.xyg=xyg;
handles.qqdg=qqdg;
handles.xreja=xreja;
handles.yreja=yreja;
guidata(hObject,handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = DISREJA_SEDIMENTOS_FIG_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in Guardar_pushbutton.
function Guardar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles=guidata(hObject);

save_graf=questdlg('¿Desea guardar las gráficas?','Guardar
imagen','Si','No','No');
switch save_graf
case 'Si'
[filename, pathname]=uiputfile('*.jpg', 'Escoja el nombre del
archivo para el perfil de flujo');
outname1=fullfile(pathname, filename);
if filename==0
return
end

```



```

        %Crear nueva figura
        figural=figure(1);

        %Realizar el gráfico
        plot(handles.xytg,handles.hytg,'b-','Displayname','Perfil de
flujo');

        hold on
        plot(handles.xreja,handles.yreja,'k-
','LineWidth',1.5,'Displayname','Reja de fondo')
        axis([-inf inf -inf inf]);
        xlabel('x (m)');
        ylabel('h (m)');
        legend('show','Location','northeast');
        hold off

        %Guardar la gráfica
        saveas(figural,outname1);
        %Cerrar figura
        close(figural)

        [filename, pathname]=uiputfile('*.jpg', 'Escoja el nombre del
archivo para la curva de descarga');
        outname2=fullfile(pathname, filename);
        if filename==0
            return
        end

        %Crear nueva figura
        figura2=figure(2);
        %Realizar el gráfico
        plot(handles.xyq,handles.qqdg,'b-','Displayname','Caudal
acumulado');

        axis([0 inf 0 inf]);
        xlabel('x (m)');
        ylabel('q (m^3/s/m)');
        legend('show','Location','southeast');
        hold off

        %Guardar la gráfica
        saveas(figura2,outname2);
        %Cerrar figura
        close(figura2)
    case 'No'
        return;
    end

% --- Executes on button press in Exportar_pushbutton.
function Exportar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles=guidata(hObject);

%Exportar datos
exportar=questdlg('¿Desea exportar los valores a un archivo en excel?','Exportar
datos','Si','No','No');
switch exportar
    case 'Si'
        Etk1={'x (m)','h (m)',' ','x (m)','q_acum (m^3/s/m)',' ','x_reja
(m)','y_reja (m)'};
        [filename, pathname]=uiputfile('*.xls', 'Escoja un nombre para el
archivo');
        outname=fullfile(pathname, filename);
        if filename==0
            return
        end
        xlswrite(outname,Etk1,'Hoja1','A1');
        xlswrite(outname,handles.xytg.','Hoja1','A2');
        xlswrite(outname,handles.hytg.','Hoja1','B2');

```

```

        xlswrite(outname,handles.xq.','Hoja1','D2');
        xlswrite(outname,handles.qqdg.','Hoja1','E2');
        xlswrite(outname,handles.xreja.','Hoja1','G2');
        xlswrite(outname,handles.yreja.','Hoja1','H2');
    case 'No'
        return
    end
guidata(hObject, handles);

```

A3.4. DISREJA COMPARAR

```

% --- Executes just before DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA is made visible.
function DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% Choose default command line output for DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.GUI1);

%Centrar interfaz en pantalla
set( handles.output,'Units','pixels' );
screenSize = get(0, 'ScreenSize');
position = get( handles.output,'Position');
position(1) = (screenSize(3)-position(3))/2;
position(2) = (screenSize(4)-position(4))/2;
set( handles.output,'Position', position );

%Borrar información en tabla
set(handles.Tabla_comp,'Data','');
set(handles.Tabla_comp,'Visible','off');

%Borrar figura
axes(handles.Tipos_comp);
cla reset

set(handles.Comp_dim_pushbutton,'Enable','on');

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = DISREJA_SEDIMENTOS_COMPARA_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in Comparar_pushbutton.
function Comparar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.Tipos_comp);
cla reset

%Definición de variables
Qd=getappdata(0,'Qdvalue');
B=getappdata(0,'Bvalue');
tgq=getappdata(0,'tgqvalue');
m=getappdata(0,'mvalue');

%Definición de constantes: aceleración de la gravedad: 9.81 m/s2
g=9.81;

%Caudales de comparación
q=Qd/B;           %m3/s/m

```

```

qi=0.125*q;      %m3/s/m
qf=q;           %m3/s/m
q=linspace(qi,qf,9);
long=length(q);

for j=1:long      %j=j;
    hc=(q(j)^2/g)^(1/3);

    %Definición de parámetros a y b para cálculo del coeficiente de
    %descarga promedio
    a=0.37*m^(-1.151);

    %b
    if m<=0.28
        b=0.05;
    elseif m<=0.313
        b=2.195*m-0.5646;
    elseif m<0.60
        b=0.27*m+0.0378;
    else
        b=0.2;
    end

    %García et al. (2018a) Tipo T
    if m<0.28
        CqoT=0.901*exp(-0.771*m);
        CqHT(j)=(a*CqoT*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        LmT(j)=q(j)/(CqHT(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));
    else
        CqoT1=0.901*exp(-0.771*m);
        CqHT1(j)=(a*CqoT1*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        LT1(j)=q(j)/(CqHT1(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));

        CqoT2=0.901*exp(-0.771*0.28);
        CqHT2(j)=(a*CqoT2*0.28)/(1+tgq)*(q(j)^0.05);
        LT2(j)=q(j)/(CqHT2(j)*0.28*sqrt(2*g*3/2*hc));

        LmT(j)=min(LT1(j),LT2(j));
    end

    fT=1.40;
    LfT(j)=fT*LmT(j);

    %García et al. (2018a) y Orth et al. (1954) Circular
    if m<0.28
        CqoO=1.4287*exp(-0.771*m);
        CqHO(j)=(a*CqoO*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        LmO(j)=q(j)/(CqHO(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));
    else
        CqoO1=1.4287*exp(-0.771*m);
        CqHO1(j)=(a*CqoO1*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        LO1(j)=q(j)/(CqHO1(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));

        CqoO2=1.4287*exp(-0.771*0.28);
        CqHO2(j)=(a*CqoO2*0.28)/(1+tgq)*(q(j)^0.05);
        LO2(j)=q(j)/(CqHO2(j)*0.28*sqrt(2*g*3/2*hc));

        LmO(j)=min(LO1(j),LO2(j));
    end

    fO=3.50;
    LfO(j)=fO*LmO(j);
end

```

```

set(handles.Tipos_comp, 'Visible', 'on');
axes(handles.Tipos_comp);
plot(q, LfO, 'ro-', 'MarkerSize', 4, 'DisplayName', 'Circular');
hold on
axis([0 inf 0 inf]);
xlabel('q (m^3/s/m)');
ylabel('L_f (m)');
legend('show', 'Location', 'southeast');

plot(q, LfT, 'b+:', 'MarkerSize', 4, 'DisplayName', 'Tipo T');
hold on
axis([0 inf 0 inf]);
xlabel('q (m^3/s/m)');
ylabel('L_f (m)');
legend('show', 'Location', 'southeast');

set(handles.Exportarfig_pushbutton, 'Enable', 'on');
set(handles.Guardar_pushbutton, 'Enable', 'on');

handles=guidata(hObject);
handles.q=q;
handles.LfO=LfO;
handles.LfT=LfT;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Exportarfig_pushbutton.
function Exportarfig_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles=guidata(hObject);

exportar=questdlg('¿Desea exportar los valores a un archivo en excel?', 'Exportar
datos', 'Si', 'No', 'No');
switch exportar
case 'Si'
    Etk1={'q (m^3/s/m)', 'Lf - circular (m)', 'Lf - tipo T (m)'};
    [filename, pathname]=uiputfile('*.xls', 'Escoja un nombre para el
archivo');
    outname=fullfile(pathname, filename);
    if filename==0
        return
    end
    xlswrite(outname, Etk1, 'Hoja1', 'A1');
    xlswrite(outname, handles.q, 'Hoja1', 'A2');
    xlswrite(outname, handles.LfO, 'Hoja1', 'B2');
    xlswrite(outname, handles.LfT, 'Hoja1', 'C2');
case 'No'
    return
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Exportab_pushbutton.
function Exportab_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles=guidata(hObject);

exportar=questdlg('¿Desea exportar la información de la tabla?', 'Exportar
datos', 'Si', 'No', 'No');
switch exportar
case 'Si'
    Etk1={'B (m)', 'Lf (m)'};
    [filename, pathname]=uiputfile('*.xls', 'Escoja un nombre para el
archivo');
    outname=fullfile(pathname, filename);
    if filename==0
        return
    end
    warning('off', 'MATLAB:xlswrite:AddSheet');
    xlswrite(outname, Etk1, 'Hoja1', 'A1');

```

```
        xlswrite(outname,handles.B.','Hoja1','A2');
        xlswrite(outname,handles.Lf1.','Hoja1','B2');
        %xlswrite(outname,Lf1.','Hoja1','C2');
    case 'No'
        return;
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Variar_pushbutton.
function Variar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Configurar accesibilidad de pushbutton
set(handles.Comp_dim_pushbutton,'Enable','on');
set(handles.Exportab_pushbutton,'Enable','off');
set(handles.Variar_pushbutton,'Enable','off');

%Borramos información en tabla
set(handles.Tabla_comp,'Data','');
set(handles.Tabla_comp,'Visible','off');

% --- Executes on button press in Comp_dim_pushbutton.
function Comp_dim_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.Comp_dim_pushbutton,'Enable','off');

%Cuadro de diálogo valores de B para la comparación
%Instrucciones
prompt={'Indique el valor inicial de B (m)','Indique el valor final de B (m)','Indique el número de comparaciones'};
%Título del cuadro de diálogo
dlg_title='Ingrese los datos de B para realizar la comparación';
%Líneas entre instrucciones
num_lines=1;
%Respuestas por defecto
def_ans={'1','10','10'};
datos=inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def_ans);

%Variables de B
Bi=str2double(datos{1});    %m
Bf=str2double(datos{2});    %m
Nfilas=str2double(datos{3});

B=linspace(Bi,Bf,Nfilas);
long=length(B);

%Otras variables
vpop12=getappdata(0,'Tipovalue');
Qd=getappdata(0,'Qdvalue');
tgq=getappdata(0,'tgqvalue');
m=getappdata(0,'mvalue');

%Definición de constantes: aceleración de la gravedad: 9.81 m/s2
g=9.81;

%Cálculo de las dimensiones para comparación
for j=1:long    %j=j;
    q(j)=Qd/B(j);    %m3/s/m
    hc=(q(j)^2/g)^(1/3); %m

    %Definición de parámetros a y b para cálculo del coeficiente de
    %descarga promedio
    a=0.37*m^(-1.151);

    %b
    if m<=0.28
        b=0.05;
```

```

elseif m<=0.313
    b=2.195*m-0.5646;
elseif m<0.60
    b=0.27*m+0.0378;
else
    b=0.2;
end

if vpop12==2
    %García et al. (2018a) Tipo T
    if m<0.28
        Cqo=0.901*exp(-0.771*m);
        CqHT(j)=(a*Cqo*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        Lm(j)=q(j)/(CqHT(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));

    else
        Cqo1=0.901*exp(-0.771*m);
        CqHT1(j)=(a*Cqo1*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        Lm1(j)=q(j)/(CqHT1(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));

        Cqo2=0.901*exp(-0.771*0.28);
        CqHT2(j)=(a*Cqo2*0.28)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        Lm2(j)=q(j)/(CqHT2(j)*0.28*sqrt(2*g*3/2*hc));

        if Lm1<Lm2
            Lm=Lm1;
        else
            Lm=Lm2;
        end
    end
    Lm1(j)=round(Lm(j),1);
    fT=1.40;
    Lf(j)=fT*Lm(j);
    Lf1(j)=round(Lf(j),1);

elseif vpop12==3
    %García et al. (2018a) y Orth et al. (1954) Circular
    if m<0.28
        Cqo=1.4287*exp(-0.771*m);
        CqHO(j)=(a*Cqo*m)/(1+tgq)*(q(j).^b);
        Lm(j)=q(j)/(CqHO(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));

    else
        Cqo1=1.4287*exp(-0.771*m);
        CqHO1(j)=(a*Cqo1*m)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        Lm1(j)=q(j)/(CqHO1(j)*m*sqrt(2*g*3/2*hc));

        Cqo2=1.4287*exp(-0.771*0.28);
        CqHO2(j)=(a*Cqo2*0.28)/(1+tgq)*(q(j)^b);
        Lm2(j)=q(j)/(CqHO2(j)*0.28*sqrt(2*g*3/2*hc));

        if Lm1<Lm2
            Lm=Lm1;
        else
            Lm=Lm2;
        end
    end
    Lm1(j)=round(Lm(j),1);
    fO=3.50;
    Lf(j)=fO*Lm(j);
    Lf1(j)=round(Lf(j),1);
end
end

%Presentación en tabla considerando oclusión
set(handles.Tabla_comp,'Visible','on');

```

```
Namecols={'B (m)', 'Lf (m)'};
D2=[B.',Lf.'];
set(handles.Tabla_comp, 'ColumnName', Namecols);
set(handles.Tabla_comp, 'Data', round(D2,1));

set(handles.Exportab_pushbutton, 'Enable', 'on');
set(handles.Variar_pushbutton, 'Enable', 'on');

handles=guidata(hObject);
handles.B=B;
handles.Lf=Lf;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in Guardar_pushbutton.
function Guardar_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles=guidata(hObject);

save_comp=questdlg('¿Desea guardar la gráfica comparativa?', 'Guardar
imagen', 'Si', 'No', 'No');
switch save_comp
    case 'Si'
        [filename, pathname]=uiputfile('*.jpg', 'Escoja el nombre del archivo');
        outname=fullfile(pathname, filename);
        if filename==0
            return
        end
        %Crear nueva figura
        figura=figure;

        %Realizar las gráficas
        plot(handles.q, handles.Lf0, 'ro-
.', 'MarkerSize', 4, 'DisplayName', 'Circular');
        hold on
        axis([0 inf 0 inf]);
        xlabel('q - m^3/s/m');
        ylabel('Lf - m');
        legend('show', 'Location', 'southoutside');

        plot(handles.q, handles.LfT, 'b+:', 'MarkerSize', 4, 'DisplayName', 'Tipo T');
        hold on
        axis([0 inf 0 inf]);
        xlabel('q - m^3/s/m');
        ylabel('Lf - m');
        legend('show', 'Location', 'southoutside');
        hold off

        %Guardar la gráfica
        saveas(figura, outname);
        %Cerrar figura
        close(figura)
    case 'No'
        return;
end
```

BIBLIOGRAFÍA

- Andaroodi, M., & Schleiss, A. (2006). Standardization of civil engineering works of small high-head hydropower plants and development of an optimization tool, LCH N°26: Communication (Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne). Recuperado de <http://infoscience.epfl.ch/record/116175>
- Andrade Borges, A. P., & Heredia Hidalgo, B. A. (2013). Diseño de las obras hidráulicas de la alternativa técnica de la Central Hidroeléctrica Sardinas Grande, provincia de Napo. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/9578>
- ASTEC Cía. Ltda. (2012). Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos de la Primera Etapa del Proyecto de Agua Potable Ríos Orientales, Ramal Chalpi Grande – Papallacta (p. 74). Recuperado de Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento website: <https://www.aguaquito.gob.ec/proyecto-chalpi/>
- Barragán Guerrero, D. O. (2017, agosto 29). Manual GUIDE en MATLAB. Recuperado 28 de febrero de 2019, de <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12122>
- Bina, K., & Saghi, H. (2017). Experimental study of discharge coefficient and trapping ratio in mesh-panel bottom rack for sediment and non-sediment flow and supercritical approaching conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 171–186. doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2017.05.022
- Bouvard, M. (1953). DÉBIT D'UNE GRILLE PAR EN DESSOUS. *La Houille Blanche*, (2), 290-291. doi: 10.1051/lhb/1953027
- Bouvard, M. (1992). Mobile Barrages and Intakes on Sediment Transporting Rivers: IAHR Monograph Series. Recuperado de <https://books.google.es/books?id=-2F0HAAACAAJ>
- Brunella, S., Hager, W. H., & Minor, H.-E. (2003). Hydraulics of Bottom Rack Intake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 2–10. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:1(2)
- Carrillo, J. M., Castillo, L. G., García, J. T., & Sordo-Ward, Á. (2018). Considerations for the design of bottom intake systems. *Journal of Hydroinformatics*, 20(1), 232-245. doi: 10.2166/hydro.2017.008
- Carrillo, J. M., García, J. T., & Castillo, L. G. (2018). Experimental and numerical modelling of bottom intake racks with circular bars. *Water (Switzerland)*, 10(5), 605. doi: 10.3390/w10050605
- Castillo, L. G. (2004). Estimation of Sediment Transport and Dominant Flow in a Hyperconcentrated Flow. The 6th International Conference on Hydro-Science and Engineering (ICHE). Presentado en Brisbane. Brisbane.
- Castillo, L. G. & Carrillo, J. M. (2011). Simulación numérica con CFD de una captación con rejillas de fondo. Jornadas sobre Modelación Hidrológica en Zonas Semiáridas Murcia, 12, 13 y 14 de diciembre.
- Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2012). Numerical Simulation and Validation of Intake Systems with CFD methodology. 2nd IAHR European Congress. Presentado en Munich. Munich.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & García, J. T. (2013a). Comparison of clear water flow and sediment flow through bottom racks using some lab measurements and CFD methodology. *Seven River Basin Management, WIT*, 172, 22–24. doi: 10.2495/RBM130191

- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & García, J. T. (2013b). Flow and Sediment Transport Through Bottom Racks. CFD Application and Verification with Experimental Measurements. Proceedings of 2013 IAHR Congress. Recuperado de https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/congresos/2013_Chengdu_Flow_and_sediment_transport.pdf
- Castillo, L. G. & García, J. T. (2011). Diseño de sistemas de captación en cauces efímeros. Jornadas sobre Modelación Hidrológica en Zonas Semiáridas Murcia, 12, 13 y 14 de diciembre.
- Castillo, L. G., García, J. T., & Carrillo, J. M. (2014). Experimental measurements of flow and sediment transport through bottom racks—Influence of gravels sizes on the rack. 7th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2014), 2165–2172. Lausanne: Leiden, The Netherlands : CRC Press/Balkema.
- Castillo, L. G., García, J. T., & Carrillo, J. M. (2016). Experimental and Numerical Study of Bottom Rack Occlusion by Flow with Gravel-Sized Sediment. Application to Ephemeral Streams in Semi-Arid Regions. *Water*, 8(4), 166. doi: 10.3390/w8040166
- Castillo, L. G., García, J. T., & Carrillo, J. M. (2017). Influence of Rack Slope and Approaching Conditions in Bottom Intake Systems. *Water*, 9(1), 65. doi: 10.3390/w9010065
- Castillo, L. G., García, J. T., Haro, P., & Carrillo, J. M. (2018). Rack length in bottom intake systems. *International Journal of Environmental Impacts: Management, Mitigation and Recovery*, 1(3), 279-287. doi: 10.2495/EI-V1-N3-279-287
- Castillo, L. G., & Lima, P. (2010). Análisis del Dimensionamiento de la Longitud de Reja en una Captación de Fondo. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Presentado en Punta del Este. Recuperado de http://www.upct.es/hidrom/publicaciones/congresos/Castillo_Captacion_de_Fondo.pdf
- Castillo, L. G., & Marin, M. D. (2009). Modelización Hidrológica e Hidráulica de sistemas de captación en cauces efímeros. I Jornadas de Ingeniería del Agua. Presentado en Madrid. Madrid.
- Castillo, L. G., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P., & Medina, J. M. (2000). Estimación de los Coeficientes de Resistencia, Transporte de Sedimentos y Caudal Dominante en el Diseño de un Encauzamiento con Flujo Hipercontrado. V Jornadas sobre Encauzamientos Fluviales, CEDEX. Presentado en Madrid. Madrid.
- Castillo, L., García, J., & Carrillo, J. (2016). Experimental and Numerical Study of Bottom Rack Occlusion by Flow with Gravel-Sized Sediment. Application to Ephemeral Streams in Semi-Arid Regions. *Water*, 8(4), 166. doi: 10.3390/w8040166
- Castro, M. (1982). Diseño de Captaciones en Ríos de Montaña. *Politécnica*, VII(1), 7-33.
- Castro, M. (1986). Sobre la Captación de Agua desde Cauces Fluviales. *Politécnica*, XI(1), 7-34.
- Castro, M. (2005). Material de clase de la materia de Hidráulica Fluvial. Presentado en Escuela Politécnica Nacional. Escuela Politécnica Nacional.
- Castro, M. (2007). Material de clase de la materia de Modelación Física de Fenómenos Hidráulicos. Presentado en Escuela Politécnica Nacional. Escuela Politécnica Nacional.
- Chan, S. N., & Lee, J. (2018). 3D CFD Modeling of a Supercritical Bottom Rack Intake. *International Symposium on Hydraulic Structures*. doi: 10.15142/T31D2J
- Chan, S. N., Wong, C. K. C., & Lee, J. H. W. (2018). Hydraulics of air–water flow in a supercritical bottom rack intake. *Journal of Hydro-environment Research*, 21, 60-75. doi: 10.1016/j.jher.2018.08.001

- Dagan, G. (1963). NOTES SUR LE CALCUL HYDRAULIQUE DES GRILLES « PAR-DESSOUS ». *La Houille Blanche*, (1), 59–65. doi: 10.1051/lhb/1963003
- De Marchi, G. (1947). Profili longitudinali della superficie libera delle correnti permanenti lineari con portata progressivamente crescente o progressivamente decrescente entro canali di sezione costante. *Ricerca scientifica e ricostruzione.*, 17(1-6), 203–208.
- Drobir, H. (1981). Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge. *Österreichische Wasserwirtschaft*, 11(12), 243–253.
- Drobir, H., Kienberger, V., & Krouzecky, N. (1999). The wetted rack length of the Tyrolean weir. IAHR-28th Congress. Presentado en Graz. Graz.
- Escuela Politécnica Nacional, (Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental), & Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2008). Diseño a nivel de Prefactibilidad de Cinco Centrales Hidroeléctricas: Nanegal, Tulipe, Chuquiraguas, Huarhuallá y Chanchán. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.
- Fernández-Jáuregui, C. A., Lauterjung, H., & Viaene, M. (1991). Taller de Microcentrales Hidroeléctricas (UNESCO Regional Office for Science and Technology for Latin America and the Caribbean (Uruguay) & GTZ, Eds.). Montevideo: UNESCO.
- Frank, J. (1956). Hydraulische Untersuchungen für das Tiroler Wehr. *Der Bauingenieur*, 31(3), 96–101.
- Frank, J. (1959). Fortschritte in der hydraulik des Sohlenrechens. *Der Bauingenieur*, 34, 12–18.
- García, J. T. (2016). Estudio experimental y numérico de los sistemas de captación de fondo (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.
- García, J. T., Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Haro, P. L. (2018). Empirical, Dimensional and Inspectional Analysis in the Design of Bottom Intake Racks. *Water*, 10(8), 1035. doi: 10.3390/w10081035
- García, J. T., Castillo, L. G., Haro, P. L., & Carrillo, J. M. (2018). Occlusion in Bottom Intakes with Circular Bars by Flow with Gravel-Sized Sediment. An Experimental Study. *Water*, 10(11), 1699. doi: 10.3390/w10111699
- Garot, F. (1939). De Watervang met liggend rooster. *De Ingenieur in Nederlandsch Indie*, 6(7), 115–132.
- Ghosh, S., & Ahmad, Z. (2006). Characteristics of Flow Over Bottom Racks. *Water and Energy Internacional*, 63(2), 47–55.
- Haro, P. L., García, J. T., Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2019). DIMRACK. Recuperado 28 de agosto de 2019, de MathWorks—File Exchange website: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72361>
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306. doi: 10.1080/00221686.2011.578914
- Hernández Muñoz, A. (2001). Depuración y Desinfección de Aguas Residuales (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Hidalgo, X., Castro, M., Poveda Flor, R. A., Jara, F., & Haro, P. L. (2006). Informe Final Proyecto PIC-CEREPS-072. «Análisis del Flujo en Estructuras para cambios de Nivel y Dirección en Sistemas de Alcantarillado de Ciudades Andinas». Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Hosseini, K., Rikhtegar, S., Karami, H., & Bina, K. (2015). Application of Numerical Modeling to Assess Geometry Effect of Racks on Performance of Bottom Intakes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(3), 677-684. doi: 10.1007/s13369-014-1542-4
- Jiménez, Ó., & Vargas, O. A. (2006). Some Experiences in the Performance of Bottom Intakes. En IAHR (Ed.), *International Symposium on Hydraulic Structures*. Guayana: IAHR.
- Krochin, S. (1978). *Diseño Hidráulico* (Segunda; E. Universitaria, Ed.). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Kumar, S., Ahmad, Z., Kothiyari, U. C., & Mittal, M. K. (2010). Discharge characteristics of a trench weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(2), 80–87. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.01.002
- Kuntzmann, J., & Bouvard, M. (1954). Étude Théorique des Grilles de Prises D'Eau du Type « En-Dessous». *La Houille Blanche*, (5), 569–574. doi: 10.1051/lhb/1954049
- Lauterjung, H., & Schmidt, G. (1989). Planning of intake structures: A publication of Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE, in: *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit <GTZ> GmbH*. Braunschweig: Vieweg.
- MathWorks. (2019). Recuperado 21 de febrero de 2019, de <https://es.mathworks.com/>
- Megaproyecto Chalpi Grande – Papallacta. (2019, febrero 15). Recuperado 20 de marzo de 2019, de Quito Informa website: <http://www.quitoinforma.gob.ec/2019/02/15/megaproyecto-chalpi-grande-papallacta-avanza-a-pasos-agigantados/>
- Méhauté, B. L., & Hanes, D. M. (2005). *Ocean Engineering Science*. Harvard University Press.
- Mostkow, M. A. (1957). Sur le calcul des grilles de prise d'eau Theoretical study of bottom type water intake. *La Houille Blanche*, 4, 570–580. doi: 10.1051/lhb/1957048
- Nakagawa, H. (1969). On Hydraulic Performance of Bottom Diversion Works. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, 18(3), 29–48.
- Noseda, G. (1956a). Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. *L' Energia Elettrica*, 41–51.
- Noseda, G. (1956b). Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. *Ricerca Sperimentale. L' Energia Elettrica*, 565–581.
- Orth, J., Chardonnet, E., & Meynardi, G. (1954). Étude de Grilles Pour Prises d'Eau du Type « En Dessous». *La Houille Blanche*, (3), 343–351. doi: 10.1051/lhb/1954034
- Ortiz Flórez, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas* (1. ed). Bogotá: Ediciones de la U.
- Programa Nacional de Riego. (2002). *Tirolesas Serie de Investigación Aplicada No 1 CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE CAPTACIÓN PARA RIEGO - PDF*. Recuperado de <https://docplayer.es/20552716-Tirolesas-serie-de-investigacion-aplicada-no-1-criterios-de-diseno-y-construccion-de-obras-de-captacion-para-riego.html>
- Proyecto Mazar-Dudas. (2018). Recuperado 6 de julio de 2018, de Proyecto Hidroeléctrico Mazar—Dudas website: <https://www.celec.gob.ec/hidroazogues/proyecto>
- Ract-Madoux, X., Bouvard, M., Molbert, J., & Zumstein, J. (1955). QUELQUES RÉALISATIONS RÉCENTES DE PRISES EN-DESSOUS À HAUTE ALTITUDE EN SAVOIE. *La Houille Blanche*, (6), 852-878. doi: 10.1051/lhb/1955064
- Raudkivi, A. J. (1993). *Sedimentation: Exclusion and Removal of Sediment from Diverted Water*. Recuperado de <https://books.google.es/books?id=Q0DEqZJxtF0C>

- Righetti, M., & Lanzoni, S. (2008). Experimental study of the flow field over bottom intake racks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 15–22. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(15)
- Righetti, Maurizio, Rigon, R., & Lanzoni, S. (2000). Indagine sperimentale del deflusso attraverso una griglia di fondo a barre longitudinali. XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 112–119. Genova.
- Schlömilch, O. X., & Witzschel, B. (1901). *Zeitschrift für Mathematik und Physik...* Recuperado de <http://archive.org/details/zeitschriftfma12runggoog>
- Simmler, H. (1978). *Konstruktiver Wasserbau*, Technische Universität Graz. Institut für Wasserwirtschaft und konstruktiven Wasserbau. Presentado en Graz, Austria. Graz, Austria.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General: Fundamentos* (18.a ed.). México: Limusa.
- Sotelo, G. (2002). *Hidráulica de Canales* (Primera; U. N. A. de M. ultad de Ingeniería, Ed.). México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Subramanya, K. (1990). Trench Weir Intake for Mini Hydro Projects. 33-41. LiSe Bangalore.
- Subramanya, K. (1994). Hydraulic Characteristics of Inclined Bottom Racks. 3-9. UOR Roorkee.
- Subramanya, K. (2009). *Flow in open channels* (Third). Tata McGraw-Hill.
- Subramanya, Kanakatti, & Shukla, S. K. (1988). Discharge diversion characteristics of trench weirs. *Journal of Civil Engg. Div.*, 69, 163–168.
- USBR. (s. f.). USBR Weir Spreadsheet, Bureau of Reclamation. Recuperado 7 de septiembre de 2018, de <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/software/usbrweir/index.html>
- Vargas, O. A. (1998). Tomas de Fondo. En IAHR (Ed.), *IAHR XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Oaxaca.
- Wahl, T. (2005). Incorporating Sharp-Crested Weirs into Irrigation SCADA Systems. 10. Vancouver, Washington.
- White, J. K., Charlton, J. A., & Ramsay, C. A. W. (1972). On the design of bottom intakes for diverting stream flows. *Proc. Inst. of Civil Engrs. (London)*, 337–345.
- Wong, K. (2009). Hydraulics of bottom rack chamber for supercritical flow diversion. [Http://Hub.Hku.Hk/Bib/B42664469](http://Hub.Hku.Hk/Bib/B42664469). doi: 10.5353/th_b4266446
- Zerihun, Y. T. (2015). Numerical simulation of flow in open channels with bottom intake racks. *Water Utility Journal*, 11, 49-61.
- Zingg, T. (1935). *Beitrag zur Schotteranalyse* (ETH Zurich). doi: 10.3929/ethz-a-000103455