



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

**COMPROBACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE AFORO POR
MOLINETE, FLOTADORES Y TRAZADOR EN UN CAUCE PEQUEÑO**

Ing. Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán
Asesorado por MSc. ing. Juan José Sandoval

Guatemala, Noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPROBACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE AFORO POR
MOLINETE, FLOTADORES Y TRAZADOR EN UN CAUCE PEQUEÑO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JÉSER ESAÚ DE JESÚS NIJ PATZÁN

ASESORADO POR MSC. ING. JUAN JOSÉ SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE:

MSC. RECURSOS HIDRÁULICOS, OPCIÓN HIDROLOGÍA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	INGA. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	INGA. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	ING. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	BR. José Milton de León Bran
VOCAL V	BR. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	INGA. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	ING. Elfego Odvin Orozco Fuentes
EXAMINADOR	ING. Juan José Sandoval
EXAMINADOR	ING. Joram Matías Gil Laroj
SECRETARIA	INGA. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de graduación titulado:

COMPROBACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE AFORO POR MOLINETE, FLOTADORES Y TRAZADOR EN UN CAUCE PEQUEÑO

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Regional de Ingeniera Sanitaria y Recursos Hidráulicos, el día 17 de noviembre de 2010.

Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán

Guatemala, 17 de noviembre de 2010

MSc, Ing. Elfego Orozco
Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Habiendo revisado el documento denominado "**Comprobación y comparación de la eficiencia de aforo por molinete, flotadores y trazador en un cauce pequeño**", que fuera elaborado por el Ing. **Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán**, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en Recursos Hidráulicos, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Juan José Sandoval
Asesor del Estudio

Guatemala, 18 de noviembre de 2010

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de Coordinador de la Maestría de Recursos Hidráulicos, el trabajo de Estudio Especial titulado:

Comprobación y comparación de la eficiencia de aforo por molinete, flotadores y trazador en un cauce pequeño

presentado por el estudiante,

Ingeniero Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) Y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Elfego Orozco
Coordinador Maestría de Recursos Hidráulicos

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9124

www.ingenieria-usac.edu.gt

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Joram Matias Gil Larroj, MSc. Ing. Juan José Sandoval y MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes; así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos, MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes y del trabajo del estudiante: Ingeniero Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán, titulado "Comprobación y comparación de la eficiencia de aforo por molinete, flotadores y trazador en un cauce pequeño", en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo.
Guatemala 19 de noviembre de 2010.

IMPRIMASE

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Pedro Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos

AGRADECIMIENTOS A:

Programa PREVDA	Por darme la oportunidad de llevar a cabo mis estudios y culminarlos.
Mi asesor, MSc. Ing. Juan José Sandoval	Por la asesoría y tiempo brindado para la elaboración de este trabajo de graduación.
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS - USAC	Por los conocimientos proporcionados para contribuir a mi desarrollo profesional.
Mi familia	Por su paciencia y apoyo durante el tiempo de duración de mis estudios.
Amigos de la facultad de ingeniería	Por su ayuda en momentos clave para el desarrollo del trabajo de graduación.
Amigos de promoción	Por los momentos vividos y compartir su conocimiento.

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Felipe de Jesús Nij
Francisca Patzán Marroquín

Mis hermanos

Hna. Alicia
Licda. Marta Lidia
Licda. Sandra Francisca
Silvia Lucrecia
Arq. Misael Nij
Elías Felipe

Mi sobrina

Larissa de Lourdes

Mis compañeros de promoción de Recursos Hidráulicos

Jorge, Alejandro, Deyman, Elvin,
Irene, Jamil, Carlos, Eduardo,
Diego, Giovanna, Thylma, Walter y
Sergio

Mis amigos estudiantes de la ERIS

Mis amigos de la facultad de ingeniería

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. GENERALIDADES DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD EN CANALES ABIERTOS	
1.1 Clases de canales abiertos	1
1.2 Distribución de velocidades en una sección de canal	3
1.3 Capa límite	5
1.4 Distribución de velocidades en flujo turbulento	9
1.5 Efecto de los gradientes de presión	13
1.6 Medición de la velocidad	14
2. AFORO DE CORRIENTES	
2.1 Tipos de aforos	19
2.2 Aforo con molinete	20
2.2.1 Selección del sitio	22
2.2.2 Normativas relacionadas con el aforo con molinete	22
2.2.3 Medición de la sección transversal	24
2.2.4 Medición de la velocidad	25
2.2.4.1 Método de distribución de la velocidad	26
2.2.4.2 Método de puntos reducidos	27
2.2.4.3 Método de integración	32
2.2.4.4 Método superficial	33

2.2.5 Determinación del caudal	34
2.2.5.1 Métodos aritméticos	34
2.2.5.2 Métodos gráficos	38
2.2.6 Exactitud del aforo con molinete	41
2.3 Aforo con flotadores	43
2.3.1 Selección del sitio	43
2.3.2 Normativas relacionadas con los aforos con flotadores	44
2.3.3 Tipos de flotadores	44
2.3.4 Procedimiento de medición	45
2.3.5 Medición de la velocidad	46
2.3.6 Determinación del caudal	48
2.3.7 Exactitud del aforo con flotadores	50
2.4 Aforos con trazadores	50
2.4.1 Selección del sitio	51
2.4.2 Normativas relacionadas con los aforos con trazadores	53
2.4.3 Trazadores y equipo de detección	55
2.4.4 Aforos por inyección constante	56
2.4.5 Aforos por inyección puntual	61
2.4.6 Determinación del caudal	64
2.4.7 Exactitud del aforo con trazadores	65
2.5 Otras normas relativas a la medición de caudal	66
3. TOMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS	
3.1 Ubicación geográfica	69
3.2 Aforo por molinete	69
3.3 Aforo por flotadores	77
3.4 Aforo por trazador	81
3.5 Resultados obtenidos	87

CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	Título	Pág.
1.	Distribución de velocidades en un canal rectangular	4
2.	Curvas de igual velocidad para diferentes secciones de canal	4
3.	Efecto de la rugosidad en la distribución de velocidades	5
4.	Desarrollo de capa límite en un canal abierto	6
5.	Perfil de velocidades en un canal liso	7
6.	Distribución de esfuerzo cortante y velocidad en flujo turbulento	11
7.	Efecto de un gradiente de presión adverso sobre la separación de la capa límite	14
8.	Sección transversal de un río y puntos de observación	21
9.	Método de un punto	28
10.	Método de dos puntos	28
11.	Método de tres puntos	29
12.	Método de cinco puntos	30
13.	Método de seis puntos	31
14.	Método de la sección media	35
15.	Método de la semisección	36
16.	Integración de la curva profundidad – velocidad	39
17.	Curvas de velocidad o isotacas	40

18.	Tipos de flotadores	44
19.	Medición de la velocidad y determinación del caudal en el aforo con flotadores	49
20.	Selección del sitio para aforo por trazadores	52
21.	Inyección constante y puntual	58
22.	Frasco de Mariotte	60
23.	Curva de conductividad contra tiempo	65
24.	Perfil de velocidades, vertical 4, sección AR2.1	72
25.	Área de influencia para vertical 4	79
26.	Inyección constante 3	84
27.	Inyección puntual 5	85
28.	Esquema de sitio para la realización de aforos	97
29.	Sección AR1	98
30.	Sección AR2	98
31.	Sección AA	98
32. – 42.	Perfiles de velocidad para verticales de sección AR1.1	102 – 104
43. – 53.	Perfiles de velocidad para verticales de sección AR1.2	108 – 110
54. – 62.	Perfiles de velocidad para verticales de sección AR2.1	114 – 115
63. – 71.	Perfiles de velocidad para verticales de sección AR2.2	119 – 120
72. – 81.	Perfiles de velocidad para verticales de sección AA.1	124 – 126
82. – 91	Perfiles de velocidad para verticales de sección AA.2	130 – 131
92.	Velocidades para sección AR1.1	133
93.	Velocidades para sección AR1.2	133
94.	Velocidades para sección AR2.1	133
95.	Velocidades para sección AR2.2	134
96.	Velocidades para sección AA.1	134
97.	Velocidades para sección AA.2	134
98.	Isotacas para sección AR1.1	135
99.	Isotacas para sección AR1.2	135

100.	Isotacas para sección AR2.1	135
101.	Isotacas para sección AR2.2	136
102.	Isotacas para sección AA.1	136
103.	Isotacas para sección AA.2	136
104.	Inyección constante 1	146
105.	Inyección constante 2	146
106.	Inyección constante 3	147
107.	Inyección constante 4	147
108.	Inyección constante 5	147
109.	Inyección puntual 1	149
110.	Inyección puntual 2	149
111.	Inyección puntual 3	149
112.	Inyección puntual 4	149
113.	Inyección puntual 5	150
114.	Vista de la sección AA	151
115.	Vista de la sección AR1	151
116.	Vista de la sección AR2	152
117.	Molinete utilizado	152
118.	Sitio de inyección del trazador	153

TABLAS

No.	Título	Pág.
1.	Normativas e informes referentes al aforo con molinete	22
2.	Número de verticales en función del canal a aforar	25
3.	Normativas e informes referentes al aforo con flotadores	44

4.	Factor “F” de ajuste de la velocidad del flotador	47
5.	Normativas e informes referentes al aforo con trazadores	53
6.	Concentraciones mínimas de sal detectables	57
7.	Normativas e informes referentes a la medición de caudales	66
8.	Sección AR1	69
9.	Sección AR2	70
10.	Sección AA	70
11.	Datos vertical 4, sección AR2.1	71
12.	Velocidades medias, vertical 4, sección AR2.1	72
13.	Relación V_m/V_s , vertical 4, sección AR2.1	73
14.	Valores de caudal obtenidos para la vertical 4, por el método de semisección, sección AR2.1	74
15.	Valores de caudal obtenidos para el segmento 4 – 5 por el método de sección media, sección AR2.1	75
16.	Determinación de V_s para vertical 4, tramo AR2 - AA	78
17.	Inyección constante 3	83
18.	Inyección puntual 5	86
19.	Caudales obtenidos con molinete	87
20.	Caudales obtenidos por aforo con flotadores	87
21.	Caudales obtenidos por aforo con flotadores, $V_{m(prom)}$	87
22.	Caudales obtenidos por inyección constante	88
23.	Caudales obtenidos por inyección puntual	88
24. – 56.	Datos de tiempos, velocidades, velocidades medias y factores V_m/V_s para sección AR1.1	99 – 102
57. – 89.	Datos de tiempos, velocidades, velocidades medias y factores V_m/V_s para sección AR1.2	104 - 108

90. – 122.	Datos de tiempos, velocidades, velocidades medias y factores V_m/V_s para sección AR2.1	110 – 113
123. – 155.	Datos de tiempos, velocidades, velocidades medias y factores V_m/V_s para sección AR2.2	115 – 119
156. – 188.	Datos de tiempos, velocidades, velocidades medias y factores V_m/V_s para sección AA.1	121 - 124
189. – 221.	Datos de tiempos, velocidades, velocidades medias y factores V_m/V_s para sección AA.2	126 – 129
222.	Resumen V_m y V_m/V_s , sección AR1.1	137
223.	Resumen V_m y V_m/V_s , sección AR1.1	137
224.	Resumen V_m y V_m/V_s , sección AR2.1	137
225.	Resumen V_m y V_m/V_s , sección AR2.2	138
226.	Resumen V_m y V_m/V_s , sección AA.1	138
227.	Resumen V_m y V_m/V_s , sección AA.2	138
228.	Determinación de caudales, sección AR1.1	139
229.	Determinación de caudales, sección AR1.2	139
230.	Determinación de caudales, sección AR2.1	139
231.	Determinación de caudales, sección AR2.2	140
232.	Determinación de caudales, sección AA.1	140
233.	Determinación de caudales, sección AA.2	140
234.	Resumen V_m/V_s , sección AR1	141
235.	Resumen V_m/V_s , sección AR2	141
236.	Resumen V_m/V_s , sección AA	141
237.	Resumen, valores V_m/V_s promedio	142
238.	Resumen, valores V_m/V_s promedio para tramos de 20 y 19 metros	142
239.	Determinación de V_s para cada vertical por medio de flotador	142
240.	Determinación de V_m para cada vertical por medio	143

	de V_m/V_s	
241.	Áreas promedio correspondientes a cada vertical	143
242.	Determinación de caudales para aforo por flotadores, tramo AR1 – AA	143
243.	Determinación de caudales para aforo por flotadores, tramo AR2 – AA	143
244.	Caudales, tramo AR1 – AA, con V_m (promedio)	143
245.	Caudales, tramo AR1 – AA, con V_m (promedio)	143
246.	Inyección constante 1	145
247.	Inyección constante 2	145
248.	Inyección constante 3	145
249.	Inyección constante 4	146
250.	Inyección constante 5	146
251.	Inyección puntual 1	147
252.	Inyección puntual 2	148
253.	Inyección puntual 3	148
254.	Inyección puntual 4	148
255.	Inyección puntual 5	149

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
F	Factor de corrección por profundidad de inmersión del flotador
K	Relación entre la velocidad media y la velocidad superficial (V_m/V_s)
Q	Caudal total circulante por una sección
q_i	Caudal relacionado a una vertical determinada
q_{i-j}	Caudal circulante entre el segmento delimitado por las verticales “i” y “j”
Rev/s	Velocidad angular en revoluciones por segundo
t	Tiempo en segundos
V	Volumen inyectado de solución de trazador
V_s	Velocidad superficial del flotador
V_m	Velocidad media para una vertical Velocidad media para una vertical (V_m)

GLOSARIO

Colorimetría	Procedimiento de análisis químico fundado en la medida de la intensidad del color de las disoluciones.
Conductividad	Propiedad física de transmitir la electricidad. Constante de proporcionalidad que relaciona la cantidad de calor que atraviesa una lámina plana con el producto del tiempo t , la superficie s de la lámina y el gradiente de temperatura.
Correntómetro	Instrumento que sirve para medir el caudal, la velocidad o la fuerza de un líquido en movimiento
Dilución	Disminuir la concentración de una sustancia por medio de un solvente.
Hidrometría	Estudio del modo de medir el caudal, la velocidad o presión de los líquidos en movimiento.

RESUMEN

Éste informe reúne algunos de los procedimientos para llevar a cabo aforos por molinete, flotadores y trazadores, con el objetivo de comprobar si dichos métodos conducen a un valor de caudal similar para una sección de canal natural dada y si existen diferencias o valores anómalos al llevarlos a cabo. En el primer capítulo se trata el tema de la capa límite para el flujo en canales, así como la curva de distribución de velocidades, concepto que es utilizado en el método del molinete al llevar a cabo las mediciones de velocidad a diferentes profundidades. En el segundo capítulo se explican las metodologías para llevar a cabo los aforos, así mismo se recopilan las normas relacionadas con los mismos. El tercer capítulo es la toma de datos y cálculos necesarios para determinar el caudal para cada método, en los primeros incisos se explica el procedimiento efectuado para determinar el caudal para cada tipo de aforo, finalmente se hace una comparación entre resultados, esto con la finalidad de determinar si diferentes tipos de aforo para una misma sección y/o tramo de un río pequeño pueden dar resultados de caudal similares..

OBJETIVOS

GENERAL:

Determinar si diferentes tipos de aforo para una sección de río conducen a valores de caudal parecidos o son resultados dispersos.

ESPECÍFICOS:

1. Dar a conocer las diferentes normativas utilizadas para llevar a cabo aforos con molinete, flotadores y trazadores.
2. Determinar en base a los resultados de las pruebas, cuando y en que condiciones es más eficiente un aforo respecto a otro.
3. Proponer un uso adecuado de los tipos de aforos llevados a cabo a manera de normativa.

INTRODUCCIÓN

El fundamento en el cual los estudios ya sea de manejo o aprovechamiento de los recursos hídricos se basan en las mediciones de las diferentes variables hidrológicas, entre ellas el caudal circulante en una corriente; una medición adecuada permitirá modelaciones y cálculos más aproximados a la realidad, mientras que mediciones realizadas de forma inadecuada puede arrojar datos poco cercanos a la misma. Dependiendo del método utilizado para determinar el caudal, siempre se verán implicadas diferentes fuentes de error en el mismo, en el caso del uso de molinetes, la precisión de este estará en función de una adecuada calibración y uso del mismo durante las mediciones en campo, en el caso de los flotadores, éstos debería seguir una trayectoria fija para cierta distancia y los trazadores pueden implicar una mala mezcla con la corriente natural o errores en la medición de los datos ya sea por el equipo utilizado o por la determinación de las concentraciones presentes luego de la inyección. Debido también a la naturaleza teórica de algunos conceptos como el balance de masa en el caso de trazadores y las curvas de distribución de velocidades en el caso de la medición con molinete o trazadores, dichos modelos pueden ver su efectividad reducida cuando las condiciones en campo tienen presentes variables que los modelos no incluyen, como la presencia de obstáculos en medio de la corriente.

1. GENERALIDADES DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD EN CANALES ABIERTOS

1.1 Clases de canales abiertos

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial. Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales varían en tamaños desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales.

Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes con las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo en estos canales se vuelvan manejables mediante el tratamiento analítico de la hidráulica teórica. Un estudio completo sobre el comportamiento del flujo en canales naturales requiere el conocimiento de otros campos como hidrología, geomorfología, transporte de sedimentos, etc.; éste constituye un tema de estudio conocido como hidráulica fluvial. Las secciones de canales naturales son, por lo general, muy irregulares y a menudo varían desde aproximadamente una parábola hasta aproximadamente un trapecio.

Para corrientes sujetas a crecientes frecuentes, el canal puede constar de una sección principal del canal que conduce los caudales normales y una o más secciones laterales de canal para acomodar los caudales de desborde. Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. Para secciones complicadas y secciones de corrientes naturales no se puede escribir una ecuación simple para expresar estos elementos, pero pueden prepararse curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para su uso en cálculos hidráulicos. Entre las definiciones de varios elementos geométricos de importancia básica se encuentran: la profundidad de flujo “ y ” que es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre. A menudo este término se intercambia con la profundidad de flujo de la sección, “ d ”. En efecto, la profundidad de flujo de la sección es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o a la altura de la sección del canal que contiene el agua. Para un canal con ángulo de pendiente longitudinal “ θ ”, puede verse que la profundidad de flujo es igual a la profundidad de sección de flujo dividida entre “ $\cos\theta$ ”. En el caso de canales empinados, por consiguiente, los dos términos, profundidad de flujo y profundidad de sección, deben utilizarse de manera discriminada. El nivel es la elevación o distancia vertical desde un punto de referencia o *datum* hasta la superficie libre, si el punto más bajo de la sección de canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es idéntico a la profundidad de flujo. El ancho superficial “ T ” es el ancho de la sección del canal en la superficie libre. El área mojada “ A ” es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo. El perímetro mojado “ P ” es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo. El radio hidráulico “ R ” es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado:

$$R = A/P$$

La profundidad hidráulica “D” es la relación entre el área mojada y el ancho de la superficie o:

$$D = A/T$$

El factor de sección para el cálculo del flujo crítico “Z” es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica o:

$$Z = A\sqrt{D}$$

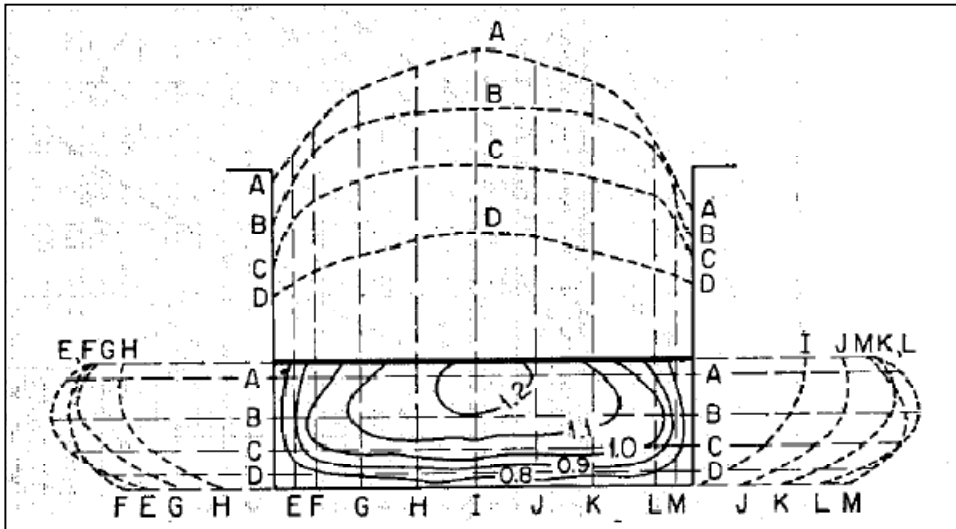
El factor de sección para el cálculo del flujo uniforme “AR^{2/3}” es el producto del área mojada y el radio hidráulico elevado a la “2/3”.

1.2 Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal. Las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad; cuanto más cerca de las bancas, más profundo se encuentra este máximo.

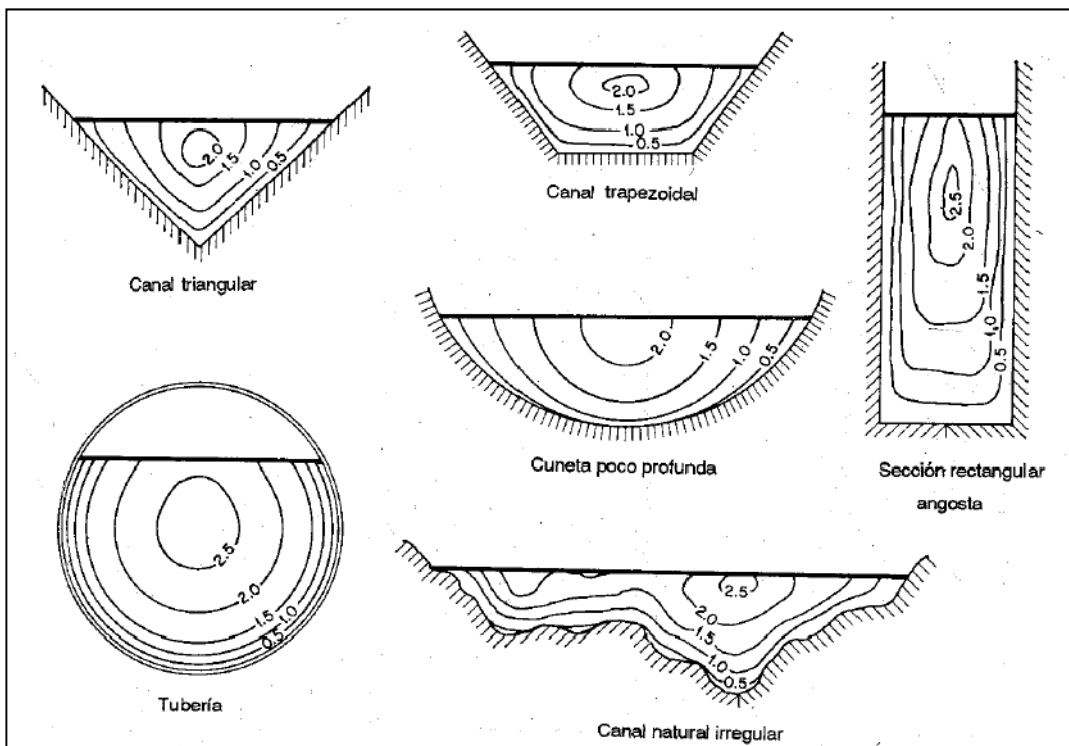
La figura 1 muestra el modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de la sección transversal. Los modelos generales para la distribución de velocidades en diferentes secciones de canal se muestran en la figura 2.

Figura 1. Distribución de velocidades en un canal rectangular.



Fuente: Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos.

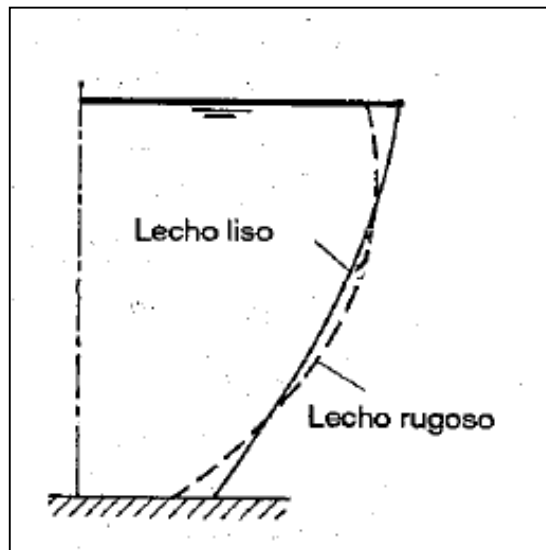
Figura 2. Curvas de igual velocidad para diferentes secciones de canal



Fuente: Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos.

La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, como una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas. En una corriente ancha, rápida y poco profunda o en un canal muy liso, la velocidad máxima por lo general se encuentra en la superficie libre. La rugosidad del canal causa un incremento en la curvatura de la curva de distribución de velocidades (figura 3). En una curva, la velocidad se incrementa de forma sustancial en el lado convexo debido a la acción centrífuga del flujo. Contrario a la creencia usual, el viento en la superficie tiene muy poco efecto en la distribución de velocidades.

Figura 3. Efecto de la rugosidad en la distribución de velocidades

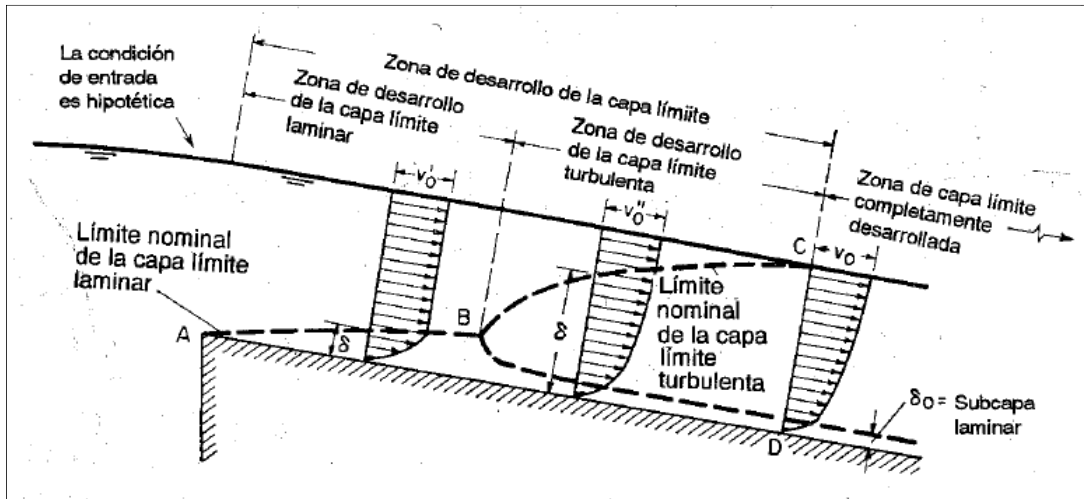


Fuente: Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos.

1.3 Capa límite

Cuando el agua entra a un canal, la distribución de velocidades a través de la sección de canal, debido a la presencia de la rugosidad de contorno, variará con la distancia a lo largo de la cual el agua se mueve en éste (figura 4).

Figura 4. Desarrollo de capa límite en un canal abierto.



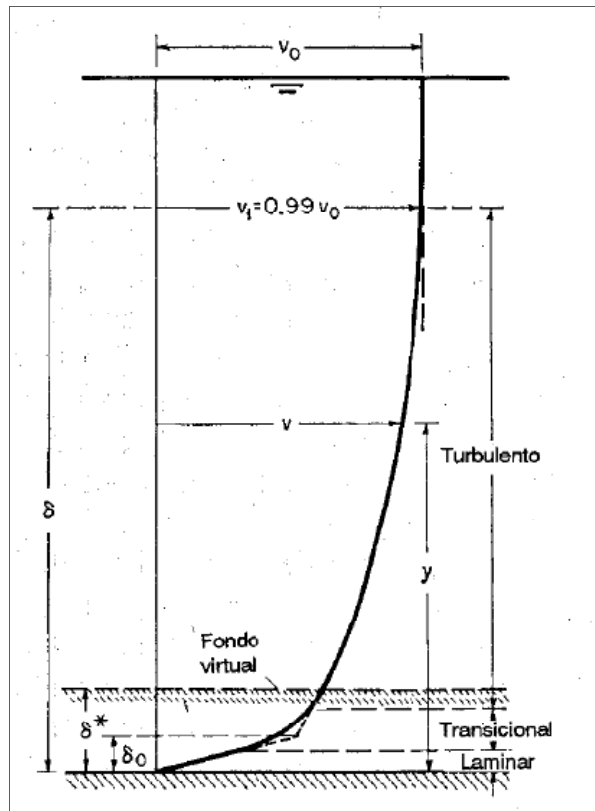
Fuente: Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos.

Si el flujo es uniforme y estable y si el canal es prismático y con rugosidad constante, la distribución de velocidades eventualmente alcanzará un patrón definido. Para propósitos de simplicidad, en el análisis se supone lo siguiente: 1) el flujo que entra al canal es laminar y con una distribución de velocidades uniforme; 2) no existe ninguna restricción a la entrada que cause perturbación abrupta en la superficie del agua y en la distribución de velocidades; 3) la profundidad de flujo es indefinidamente grande, de tal manera que puede considerarse constante a medida que el agua entra al canal. En el canal, el efecto sobre la distribución de velocidades debido al contorno se indica mediante la línea "ABC".

Por fuera de la superficie representada por "ABC", la distribución de velocidades es prácticamente uniforme. Cerca de la superficie del canal, dentro de la región "ABC", la velocidad varía de acuerdo con la distancia desde la superficie del canal. La región dentro de "ABC", a pesar de no ser distinguible, se conoce como capa límite y su espesor se designa mediante " δ ".

Como la capa límite no puede distinguirse, su espesor ha sido definido arbitrariamente en varias formas. Una definición comúnmente utilizada es que su espesor es la magnitud de la distancia normal desde la superficie del contorno para la cual la velocidad " v_1 " es igual al 99% de la velocidad límite " v_0 " hacia la cual la curva de distribución de velocidades en la capa límite se aproxima asintóticamente.

Figura 5. Perfil de velocidades en canal liso.



Fuente: Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos.

El efecto de la capa límite sobre el flujo es equivalente a desplazar imaginariamente hacia arriba el fondo del canal, hasta una posición virtual, en una cantidad igual al llamado espesor de desplazamiento, δ^* , (figura 5), el cual se determina de la siguiente forma:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{V}{V_1}\right) dy$$

Donde:

V = velocidad superficial a una distancia “ y ” desde la superficie del canal

V_1 = velocidad en el borde de la capa límite

El valor del espesor de desplazamiento por lo general varía desde un octavo hasta un décimo del espesor de la capa límite, de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds. Al comienzo del flujo en el canal (ver figura 4) el flujo es completamente laminar y se desarrolla una capa límite laminar a lo largo de la superficie del canal, como se muestra mediante la curva “AB”. La distribución de velocidades en la capa es casi parabólica. A medida que el agua viaja en sentido aguas abajo en el canal, el flujo en la capa límite eventualmente cambiará a turbulento. El punto donde ocurre este cambio se indica mediante “B”. Hacia aguas debajo de “B” se desarrolla una capa límite turbulenta, como se muestra mediante “BC”. Puede demostrarse analíticamente que la distribución de velocidades en esta capa es casi logarítmica. Si la superficie del canal es relativamente lisa, la velocidad cerca de la superficie del canal es baja; por tanto se desarrolla una lámina muy delgada y estable de flujo conocida como subcapa laminar. Dentro de la subcapa laminar el flujo se mantiene laminar. La superficie superior de la subcapa laminar corresponde a la zona de transición de flujo laminar a turbulento y, por consiguiente, no puede definirse con precisión. Si a través del canal existen condiciones de flujo uniforme, la capa límite turbulenta se desarrollará por completo en la sección “CD”; de ahí en adelante la capa límite laminar “AB” puede eliminarse con facilidad colocando un elemento de rugosidad a la entrada.

Luego, la capa límite turbulenta se desarrollará exactamente al inicio del canal, y la longitud total de la zona para el desarrollo completo de la capa límite puede acortarse.

1.4 Distribución de velocidades en flujo turbulento

La distribución de velocidades en un flujo uniforme en canales se vuelve estable cuando la capa límite turbulenta se encuentra completamente desarrollada. En la capa límite turbulenta puede demostrarse que la distribución es casi logarítmica. El esfuerzo cortante en cualquier punto de un flujo turbulento que se mueve sobre una superficie sólida fue dado por Prandtl como:

$$\tau = \rho L^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2$$

Donde:

ρ = densidad de masa = W/g , “ W ” es el peso unitario del fluido y “ g ” es la aceleración de la gravedad

L = una longitud característica, conocida como longitud de mezcla

dV/dy = gradiente de velocidad a una distancia normal y desde la superficie sólida

Para la región cercana a la superficie sólida, Prandtl introdujo dos suposiciones: 1) que la longitud de mezcla es proporcional a “ y ”, y 2) que el esfuerzo cortante es constante. Como el esfuerzo cortante en la superficie del canal es igual a la fuerza tractiva unitaria, la segunda suposición da “ $\tau = \tau_0$ ”. A partir de estas dos suposiciones, la ecuación puede reescribirse como:

$$dV = \frac{1}{k} \left(\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \right) \frac{dy}{y}$$

Donde:

k = constante para la proporcionalidad entre “L” y “y”. El valor de “k” ha sido determinado en experimentos y es alrededor de 0.40. Al integrar la ecuación se tiene:

$$V = 0.25 \left(\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \right) \cdot \ln \left(\frac{y}{y_0} \right)$$

Donde “y₀” es una constante de integración. A partir de esta ecuación y sabiendo que “W = ρg”, puede notarse que:

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R \cdot S} = V_f$$

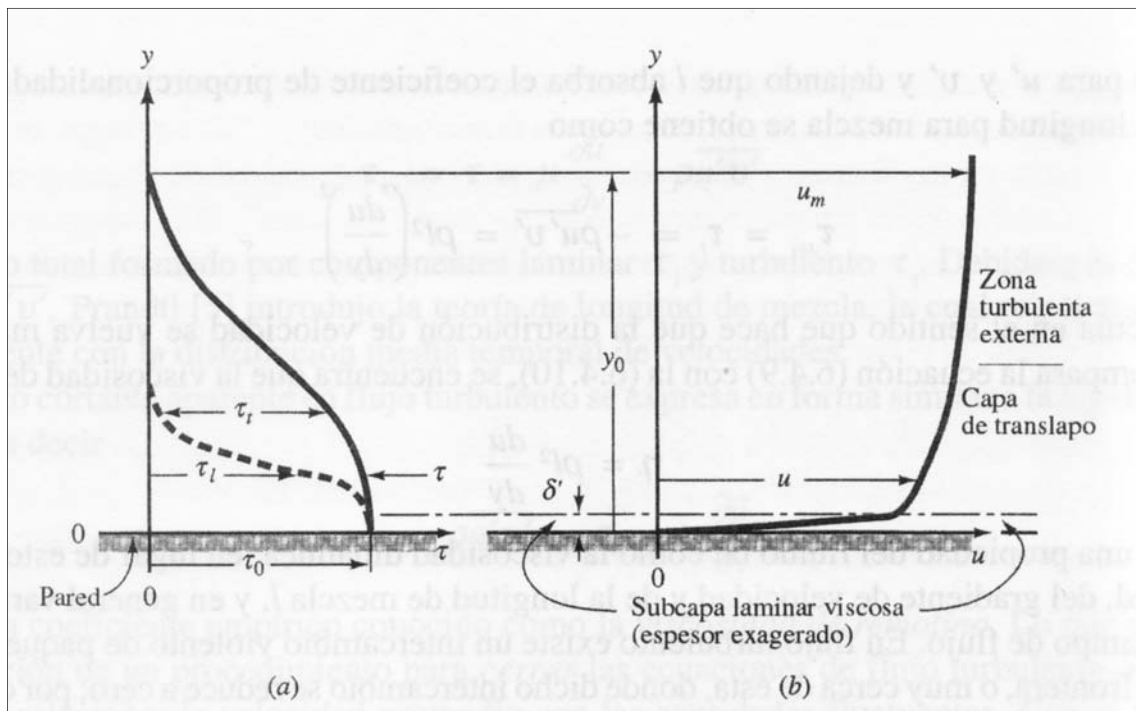
La cantidad representada por “V_f” tiene dimensiones de una velocidad. Debido a que ésta varía con la fricción en el contorno “τ₀”, se conoce como velocidad de fricción o velocidad de corte. Luego finalmente la ecuación puede escribirse como:

$$V = 0.25 \cdot V_f \cdot \ln \left(\frac{y}{y_0} \right)$$

Esta última ecuación indica que la velocidad en la región turbulenta es una función logarítmica de la distancia “y”.

Por lo general se conoce como ley universal de distribución de velocidades, de Prandtl – von – Kármán. Esta ley ha sido verificada mediante experimentos. Los resultados indican una similitud notable entre las distribuciones observadas y calculadas y por consiguiente, ofrece una justificación razonable para el uso de esta ley logarítmica en problemas prácticos. En flujos turbulentos, las condiciones cercanas a una superficie son considerablemente más complejas que en flujos laminares. Es conveniente visualizar la capa de esfuerzo turbulento cerca de una pared lisa como dividida en tres capas (figura 6).

Figura 6. Distribución de esfuerzo cortante y velocidad en flujo turbulento



Fuente: Streeter, Victor; Mecánica de fluidos

En la capa viscosa cercana a la pared o subcapa laminar, el esfuerzo cortante en el fluido es esencialmente constante e igual al esfuerzo cortante en la pared “ τ_0 ”.

La distribución de velocidad está relacionada con el esfuerzo cortante y la viscosidad absoluta dentro de la región “ $\delta' > y$ ” mediante la ley de viscosidad de Newton:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{u}{y} = \nu \cdot \frac{u}{y}$$

Donde:

$$y \leq \delta'$$

$\delta' = \delta^*$ = espesor de la subcapa laminar

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_* = V_f, \text{ velocidad de fricción o cortante}$$

Por lo tanto:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u \cdot y}{\nu}$$

Muestra una relación lineal entre “ u ” y “ y ” en la película laminar. Éste se extiende hasta un valor de “ $y \cdot u_* \approx 5$ ”, es decir:

$$\delta' = 5 \cdot \frac{\nu}{u_*}$$

En la capa de traslape se supone que el esfuerzo cortante es aproximadamente igual al esfuerzo cortante en la pared (figura 6), pero la turbulencia domina y el esfuerzo cortante viscoso no es importante. Por consiguiente se tiene la ecuación:

$$\tau = \rho L^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

Debido a que “L” tiene dimensiones de longitud, y basados en consideraciones dimensionales, debería ser proporcional a “y” (la única dimensión lineal importante), se supone “L = ky”. Por sustitución se tiene:

$$\frac{du}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \frac{dy}{y}$$

Y la integración da como resultado:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln(y) + \text{constante}$$

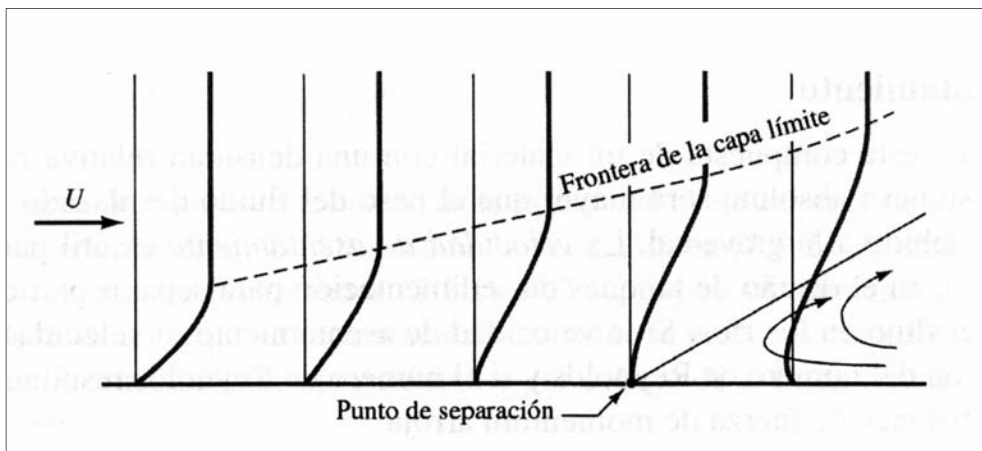
Debe notarse que al sustituir el valor de “u” en la ecuación, también se determina “L” como proporcional a “y” (“d²u/dy²” es negativo, debido a que el gradiente de velocidad disminuye a medida que “y” crece).

1.5 Efecto de los gradientes de presión

A lo largo de una placa plana, la capa límite continúa creciendo en la dirección aguas abajo, sin importar la longitud, cuando el gradiente de presión es igual a cero. Si la presión decrece en la dirección hacia aguas abajo, tal como ocurre en una sección reductora cónica, la capa límite tiende a reducir su espesor. Para gradientes de presión adversos, es decir, con presiones que se incrementan en la dirección hacia aguas abajo, la capa límite aumenta rápidamente su espesor. El gradiente adverso y el esfuerzo cortante en la frontera disminuyen el momentum en la capa límite, y si ambos actúan sobre una distancia suficiente, hacen que la capa límite se detenga.

Este fenómeno se conoce como separación. La figura 7 ilustra este caso. La línea de corriente de la frontera debe alejarse de la frontera sólida en el punto de separación, y aguas debajo de este punto el gradiente de presión adverso produce un flujo hacia atrás de la pared sólida. Esta región aguas abajo de la línea de corriente que se separa de la frontera sólida se conoce como estela. El efecto de la separación es disminuir la cantidad neta de trabajo que puede ser hecho por un elemento de fluido sobre el fluido circundante, a costa de su energía cinética, con el resultado neto de que la recuperación de presión es incompleta y que las pérdidas en el fluido (arrastre) se incrementan.

Figura 7. Efecto de un gradiente de presión adverso sobre la separación de la capa límite.



Fuente: Streeter, Victor; Mecánica de fluidos

1.6 Medición de la velocidad

De acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del USGS, la sección transversal del canal se divide en franjas verticales por medio de un determinado número de verticales sucesivas y las velocidades medias en las verticales se determinan midiendo la velocidad a 0.6 de la profundidad en cada vertical o tomando el promedio de las velocidades a 0.2 y 0.8.

El origen de la medición de la velocidad media a 0.2, 0.6 y 0.8 de profundidad se basa esencialmente en la distribución teórica de velocidades en un canal abierto. Para condiciones de flujo turbulento sobre una superficie rugosa, la curva de distribución de velocidades tiene una forma aproximada a una parábola. Cuando la profundidad y velocidad incrementan, sin embargo, la curva se aproxima a una línea vertical en su posición límite. En un canal abierto con una profundidad “d”, siendo esta una superficie libre, para encontrar el punto en el cual la velocidad puntual es igual a la velocidad media se tiene la ecuación:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$$

Donde:

y_0 = factor de integración derivado de la condición que está muy cerca del fondo rugoso del canal donde “ $y = y_0$ ”.

Como resultado “ $u = 0$ ”. La velocidad media se determina por:

$$\bar{V} = \frac{1}{d - y_0} \cdot \int_{y_0}^d \left[\frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \right] dy$$

O con “ $y_0 \ll 1$ ”, como:

$$\bar{V} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{d}{y_0}\right) - \frac{u_*}{k}$$

Se encuentra una ley de déficit de velocidad como:

$$\frac{V - u}{u_*} = \frac{1}{K} \cdot \text{Ln} \left(\frac{d}{y} \right) - \frac{1}{k}$$

O:

$$u = - \frac{u_*}{k} \cdot \text{Ln} \left(\frac{d}{y} \right) + \frac{u_*}{k} + V$$

Igualando “u = V”, la profundidad a la cual la velocidad puntual a la velocidad media es:

$$\text{Ln} \left(\frac{y}{y_0} \right) = \text{Ln} \left(\frac{d}{y_0} \right) - 1$$

$$y = 0.3679 \cdot d \cong 0.4 \cdot d$$

Este valor de “y” se utiliza como la velocidad media en lugar de medir la distribución de velocidad para encontrar el promedio. La distribución vertical de velocidades puede ser también expresada aproximadamente por la ecuación:

$$v = \left(\frac{D - h}{a} \right)^{1/c}$$

Donde:

V = velocidad a la altura “h” bajo la superficie del agua

c = coeficiente usualmente de valor 6

D = profundidad de flujo total

a = constante numéricamente igual a la distancia por encima del fondo del canal de un punto en el que la velocidad tiene un valor unitario

Integrando la ecuación para la velocidad media V_m (\bar{V}):

$$\bar{V} = \frac{1}{D} \cdot \int_0^D V dh = \frac{1}{D} \cdot \int_0^D \left(\frac{D-h}{a} \right)^{1/c} dh$$

$$\bar{V} = \frac{1}{D} \cdot \left[-\frac{a \cdot c}{c+1} \cdot \left(\frac{D-h}{a} \right)^{\frac{1}{c}+1} \right]_0^D$$

Entonces:

$$\bar{V} = \frac{c}{c+1} \cdot \left(\frac{D}{a} \right)^{\frac{1}{c}}$$

Haciendo $V_m = V$:

$$\frac{c}{c+1} \cdot \left(\frac{D}{a} \right)^{\frac{1}{c}} = \left(\frac{D-d}{a} \right)^{1/c}$$

Y:

$$\left(\frac{c}{c+1} \right)^c = \frac{D-d}{D}$$

Por lo tanto:

$$\frac{h}{D} = 1 - \left(\frac{c}{c+1} \right)^c$$

Y sustituyendo valores de “c” entre 5 y 8 en la ecuación, la relación “h/D” es aproximadamente igual a 0.6. Si “V_{0.2}” es la velocidad a una profundidad de “0.2D”, “V_{0.8}” es la velocidad a “0.8D” y “V_m = 1/2 · (V_{0.2} + V_h)”, entonces:

$$\frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{D - 0.2D}{a} \right)^{1/c} + \left(\frac{D - h}{a} \right)^{1/c} \right] = \frac{c}{c+1} \cdot \left(\frac{D}{a} \right)^{1/c}$$

$$\frac{D - h}{a} = \frac{D}{a} \cdot \left[\frac{2c}{c+1} \cdot (0.8)^{1/c} \right]^c$$

Y:

$$h = D - D \cdot \left[\frac{2c}{c+1} \cdot (0.8)^{1/c} \right]^c$$

Sustituyendo “c” igual a 0.6, la relación “h/D” tiene un valor aproximado de “0.82”, siendo entonces “V_m = 1/2 · (V_{0.2} + V_{0.8})”, el mismo procedimiento puede repetirse, a partir de la ecuación “V_m = 1/2 · (V_h + V_{0.8})”, dando un valor de la relación “h/D” aproximadamente igual a 0.27.

2. AFORO DE CORRIENTES

2.1 Tipos de aforos

Los aforos directos son el fundamento del buen funcionamiento de las estaciones de aforo. Estas mediciones se realizan para obtener los puntos necesarios para construir las curvas de calibración o comprobar su bondad una vez que se están utilizando. Los aforos directos se utilizan por el interés especial de conocer directamente el caudal de un río, canal o manantial en el momento en que se hace la medida. Un aforo líquido o de corriente es un procedimiento que consiste en realizar una serie de mediciones en campo que permiten posteriormente calcular el caudal. Este caudal debe estar asociado a un nivel del agua.

El caudal puede medirse por diferentes métodos; la elección del método de aforo depende de las condiciones específicas de cada sitio; la mayoría de estos métodos están basados en la medición de la velocidad y el área en una sección transversal determinada. Generalmente se efectúan aforos periódicos para determinar la relación entre el nivel del agua y el caudal en la estación hidrométrica, con estos datos se construye la curva de gastos o curva de calibración nivel de agua – caudal con la cual es posible determinar el flujo cuando sólo se cuenta con el dato de nivel. A continuación se muestran algunos de los métodos de aforo utilizados.

2.2 Aforo con molinete

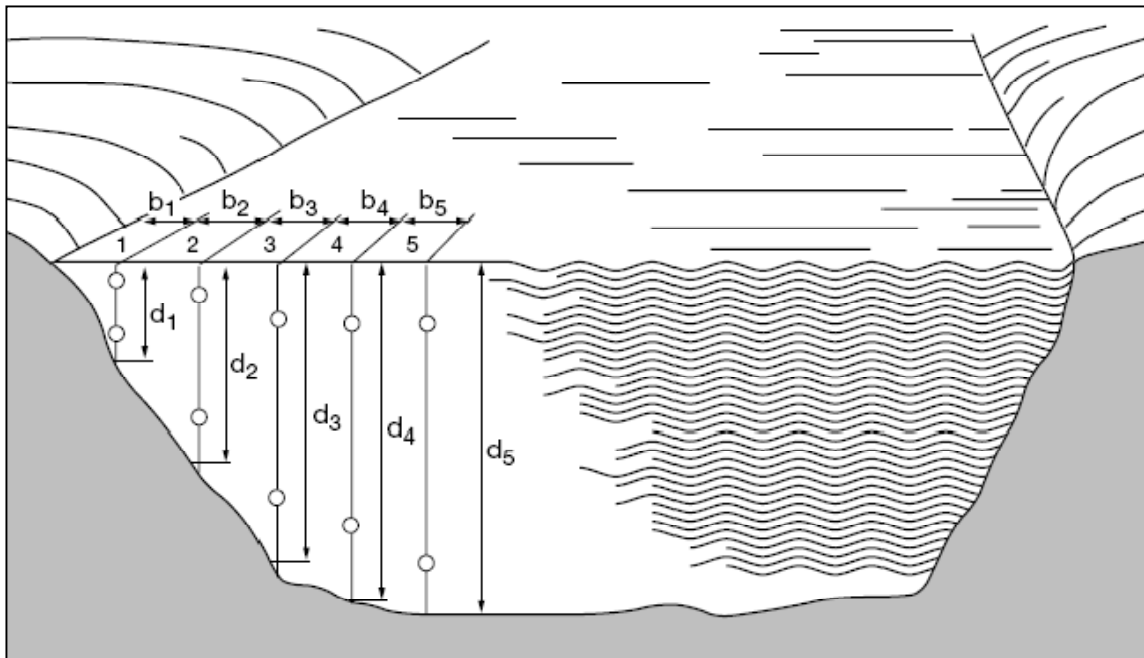
Forma parte de los llamados métodos de área – velocidad. Los molinetes funcionan haciendo que el movimiento de la corriente haga girar un eje a través de una hélice. Estando el aparato colocado en el seno de la corriente, mientras la velocidad de la misma permanezca constante, el eje girará con una velocidad también constante, es decir que así puede medirse la velocidad de las aguas en la zona donde esté colocado el aparato. El número de revoluciones “n” de giro se mide a través de un sistema de platinos que cierran un contacto por cada cierto número de revoluciones.

Esta acción hace sonar un timbre por medio de la correspondiente batería de pilas. Los golpes del timbre se pueden contrastar fácilmente con un cronómetro, de forma que se llega a conocer con suficiente exactitud el valor de la velocidad angular “n” (revoluciones por unidad de tiempo). El molinete puede ir fijado a unas barras verticales que se apoyan en el cauce, o bien suspendido en un cable. Si el aparato está sostenido por barras la orientación del mismo, paralela al eje de la corriente, ha de ser dada por el aforador, que cuidará sea correcta. Cuando va suspendido, para que permanezca orientado correctamente ha de ir provisto de un timón o cola orientadora.

El aforo con molinete se basa en determinar, la velocidad de las aguas en distintos puntos de una sección transversal de río, lo suficientemente próximos como para poder dibujar las líneas isotacas o líneas de igual velocidad. La utilización práctica del molinete se hace normalmente dividiendo la superficie libre transversal del río en “n +1” partes, fijando puntos, de los cuales el primero estará muy próximo a una orilla y el segundo a la opuesta.

En cada uno de estos puntos se sitúa el molinete a distintas profundidades, con lo que se determina la velocidad del río en “N” puntos. De esta manera, los puntos donde la velocidad se ha determinado, quedan situados todos en línea vertical. Para determinar el caudal la mayoría de las veces no se utilizan las isotacas y se divide el eje transversal en segmentos verticales (ver figura 8), de manera que cada uno de ellos, tiene como mediana el eje vertical donde se coloca el molinete. Al mismo tiempo que se mide la profundidad, se hacen mediciones de la velocidad con el molinete en uno o más puntos de la vertical para cada segmento. La medición del ancho, profundidad y velocidad permiten determinar la velocidad media para cada segmento y el caudal correspondiente a cada uno. La suma de los caudales de estos segmentos representa el caudal total.

Figura 8. Sección transversal de un río y puntos de observación



Fuente: Guía de prácticas hidrológicas de la OMM No. 168.

2.2.1 Selección del sitio

Para las mediciones, la sección debe cumplir lo siguiente:

- a) Velocidades paralelas en todos los puntos y que formen ángulo recto con la sección transversal de la corriente.
- b) Curvas regulares de distribución de velocidad en la sección, en los planos vertical y horizontal.
- c) Velocidades superiores a 0.150 m/s.
- d) Lecho del río uniforme y estable.
- e) Profundidad superior a 0.300 m.
- f) Ausencia de plantas acuáticas.

2.2.2 Normativas relacionadas con el aforo con molinete

Tabla 1. Normativas e informes referentes al aforo con molinete

Normativa o informe	Contenido
Guía de prácticas hidrológicas de la OMM (OMM No. 168), Capítulo 11, inciso 11.2	Descripción de métodos para determinación de velocidad media, número de secciones, factores de corrección, y otros referentes a los aforos por medio de molinete.
Publicación del USGS, <i>Chapter A6, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, General procedure for gaging streams</i>	Introducción a los diferentes métodos de aforo de corrientes

Normativa o informe	Contenido
Publicación del USGS, <i>Chapter A8, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Discharge measurements at gaging stations</i>	Descripciones de tipos de molinete, equipo y recomendaciones de uso, métodos para la determinación de la velocidad media y perfiles de velocidad
Publicación del USGS, <i>Chapter A21, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Stream – gaging cableways</i>	Recomendaciones y requerimientos para la construcción de estaciones para aforos por suspensión
Organización internacional de normalización, 1976: <i>Liquid flow measurement in open channels: Calibration of rotating – element current – meters in straight open tanks. ISO 3455, Ginebra</i>	Calibración de molinetes en canales rectos abiertos
Organización internacional de normalización, 1988: <i>Liquid flow measurement in open channels: Rotating - element current – meters, segunda edición ISO 2537, Ginebra</i>	Estándares de los diferentes tipos de molinetes
Organización internacional de normalización, 2007: <i>Hydrometry: Calibration of rotating – element current – meters in straight open tanks. ISO 3455, Ginebra</i>	Calibración de molinetes en canales rectos abiertos

Fuente: elaboración propia, con base a información de la guía No. 168 de la OMM y bibliografía referenciada en el libro *Streamflow Measurement, Third edition.*

2.2.3 Medición de la sección transversal

Para conocer la velocidad media en la sección transversal del cauce, debe medirse la velocidad de la corriente en un número suficiente de puntos de la sección. Si el aforo se realiza desde un puente y éste es de varios tramos, los pilares intermedios darán lugar a una constricción o a una expansión de las líneas de corriente, lo que puede falsear las mediciones. Si no hay ningún puente en el tramo escogido del río, podrá utilizarse un bote bien anclado a las dos orillas. Dado que se puede dividir el cauce en secciones verticales y calcular la velocidad media en cada una de ellas, para obtener una precisión suficiente se recomienda que el área de cada una de las secciones verticales no supere el 10% del área total.

La exactitud de las mediciones de caudal depende del número de verticales en que se efectúen las mediciones de profundidad y velocidad. Las verticales de observación deben localizarse de modo que se puedan definir adecuadamente los cambios del lecho de la corriente y la variación horizontal de la velocidad. En general, el espacio entre dos verticales sucesivas no debe superar $1/20$ del ancho total y el caudal entre ellas no deberá ser mayor al 10% del caudal total. El ancho del cauce y la distancia entre las verticales deben ser obtenidos por mediciones hechas a partir de un punto fijo de referencia (generalmente un punto inicial en la margen), que deberá hallarse en el mismo plano de la sección transversal, se comienza siempre en un punto fijo de origen establecido de manera definitiva, para que todos los aforos se realicen sobre la misma sección. De ser posible, deben utilizarse las mismas verticales de medición para hacer comparables aforos futuros con aforos anteriores. Considerando un número “n” de verticales de medición, se puede aplicar el criterio que se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Número de verticales en función del ancho del canal a aforar

Ancho del canal (en metros)	Número de verticales (n)
0 – 0.5	3 – 4
0.5 – 1	4 – 5
1 – 3	5 – 8
5 – 10	10 – 20
Más de 10	20 o más

Fuente: Norma ISO 748, método área – pendiente

Generalmente las verticales de medición son equidistantes, pero en determinadas circunstancias se definen algunas de ellas más próximas al eje de velocidades máximas, en pilares de puentes y en orillas o márgenes verticales (bancas). El ancho de la sección transversal se obtiene mediante la sumatoria de los anchos parciales existentes entre las verticales utilizadas para el aforo. Cuando el canal es demasiado ancho para aplicar métodos convencionales de medición, la distancia horizontal se puede determinar por distanciómetros ópticos, electrónicos o por métodos planimétricos. La profundidad total es la distancia en metros que existe en cada una de las verticales de medición entre la superficie y el lecho de la corriente.

2.2.4 Medición de la velocidad

La velocidad del flujo en un punto determinado se mide generalmente contando el número de revoluciones del rotor del molinete durante un corto período de tiempo medido con un cronómetro. Los molinetes se calibran a fin de cubrir la gama de velocidades del flujo que ha de medirse. Los procedimientos de calibración detallados se describen en la norma ISO 3455. Los molinetes pueden calibrarse individualmente o en conjunto.

Los molinetes calibrados individualmente deben ser recalibrados después de tres años o de 300 horas de uso o cuando se dude de su funcionamiento. La velocidad se determina en uno o más puntos en cada vertical contando las revoluciones del rotor en un lapso recomendado de 60 segundos como mínimo y durante un período máximo de tres minutos si la velocidad del agua es pulsatoria. En canales poco profundos, el molinete debe sostenerse en la posición deseada por medio de una varilla de vadeo. En canales demasiado profundos o muy rápidos para medirse por vadeo, el molinete se debe suspender de un alambre o varilla desde un puente, teleférico o embarcación. Cuando se utiliza una embarcación, el molinete debe sostenerse de manera que no lo afecten las perturbaciones causadas por la embarcación. Con el molinete colocado en el punto seleccionado de la vertical, se le alineará en la dirección de la corriente antes de comenzar las mediciones. La velocidad media en cada vertical se puede determinar con uno de los siguientes métodos:

- a) Método de distribución de la velocidad.
- b) Métodos de puntos reducidos.
- c) Método de integración.
- d) Método gráfico

2.2.4.1 Método de distribución de la velocidad

La velocidad media por este método se obtiene a partir de las observaciones de la velocidad efectuadas en un determinado número de puntos a lo largo de cada vertical, entre la superficie del agua y el lecho del canal. Las observaciones de la velocidad en cada posición deberán ser trazadas en un gráfico y la velocidad media se determinará al dividir el área formada por este trazo entre la profundidad.

“Los valores de la velocidad se obtienen de observaciones en un número de puntos en cada vertical entre la superficie libre del agua y el fondo del canal. El número y espaciamiento entre puntos debe seleccionarse según la distribución de velocidad en cada vertical, la diferencia de lecturas entre dos puntos adyacentes no debe ser mayor al 20% con respecto al valor mayor” (ISO 1088, 1985).

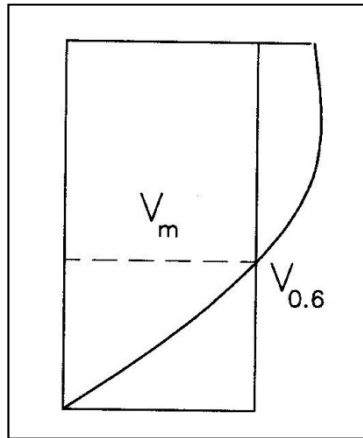
Para hacer el gráfico puede ser necesario estimar las velocidades del flujo cerca del lecho, suponiendo que la velocidad para cierta distancia por encima del lecho del canal es proporcional al logaritmo de la distancia “x” desde el mismo. Si la velocidad observada en los puntos próximos al lecho se lleva a un gráfico en función del logaritmo “x”, la línea que más ajuste los puntos puede extenderse hasta el lecho y las velocidades cercanas a él pueden leerse en el gráfico.

“El método no es conveniente para mediciones rutinarias de caudal por que el aumento aparente en la precisión se puede perder por errores ocasionados por las variaciones del nivel del agua durante los largos períodos de tiempo que son necesarios para hacer este tipo de aforo” (ISO 748 ,1997).

2.2.4.2 Método de puntos reducidos

a) Método de un punto: la velocidad se debe medir en cada vertical colocando el molinete a 0.6 de la profundidad a partir de la superficie libre del agua. El valor observado se considera como la velocidad media en la vertical. El método de un punto se usa en aguas someras o poco profundas (profundidades menores a 60 cm).

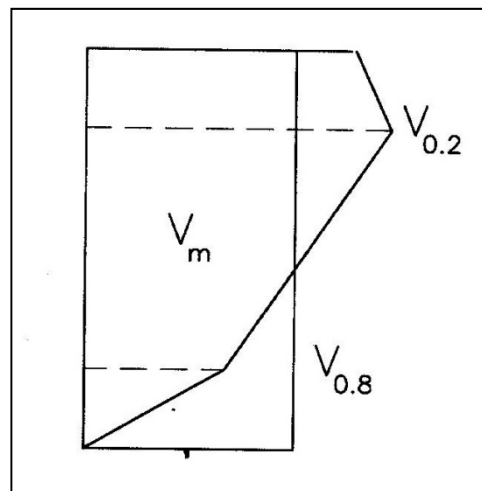
Figura 9. Método de un punto.



Fuente: elaboración propia.

b) Método de dos puntos: las observaciones de velocidad se deben hacer en cada vertical, colocando el molinete a 0.2 y 0.8 de profundidad a partir de la superficie. El promedio de los dos valores puede considerarse como la velocidad media en la vertical. El método de dos puntos se emplea cuando la distribución de velocidades es regular y la profundidad es superior a unos 60 cm.

Figura 10. Método de dos puntos.

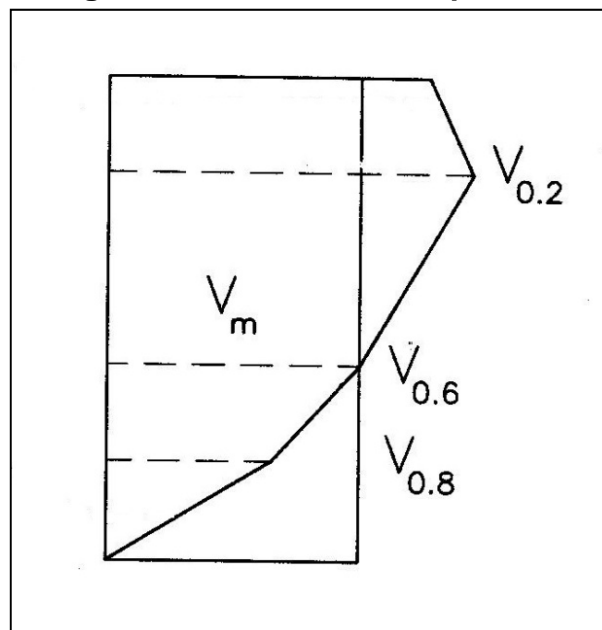


Fuente: elaboración propia.

c) Método de tres puntos: la velocidad se mide colocando el molinete en cada vertical a 0.2, 0.6 y 0.8 de profundidad a partir de la superficie. El promedio de los tres valores puede ser considerado como la velocidad media en la vertical. Se puede también ponderar la medición a 0.6. El método de tres puntos debe utilizarse para mediciones en canales cubiertos por vegetación acuática. La velocidad media se obtiene con la ecuación:

$$\bar{V} = 0.25 \cdot (V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.6} + V_{0.8})$$

Figura 11. Método de tres puntos.



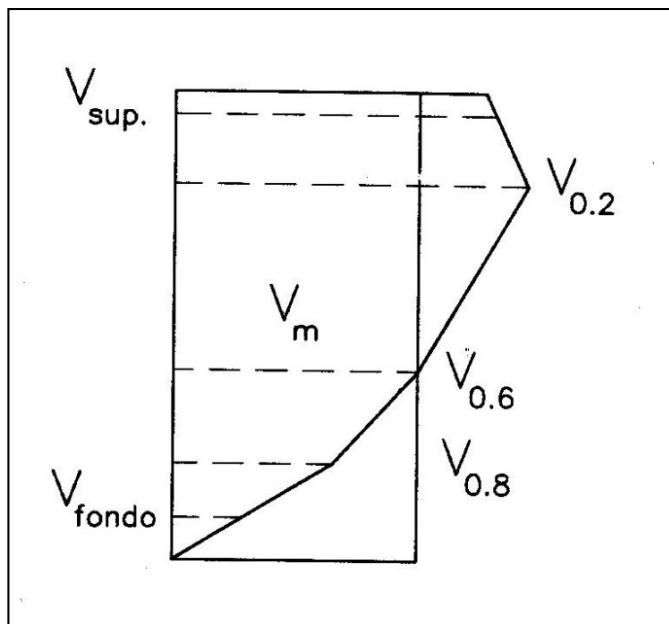
Fuente: elaboración propia.

e) Método de cinco puntos: el método de cinco puntos puede utilizarse cuando el canal está libre de vegetación acuática y/o cuando la distribución vertical de la velocidad es muy irregular. Consiste en medir la velocidad en cada vertical a 0.2, 0.6 y 0.8 de profundidad a partir de la superficie y tan cerca como sea posible de la superficie y del lecho (también pueden estimarse por medio de una aproximación logarítmica de ser posible).

La velocidad media podrá determinarse del gráfico que represente el perfil de velocidades como en el método de distribución de velocidades o a partir de la ecuación:

$$\bar{V} = 0.10 \cdot (V_{\text{superficie}} + 3 \cdot V_{0.2} + 3 \cdot V_{0.6} + 2 \cdot V_{0.8} + V_{\text{lecho}})$$

Figura 12. Método de cinco puntos.

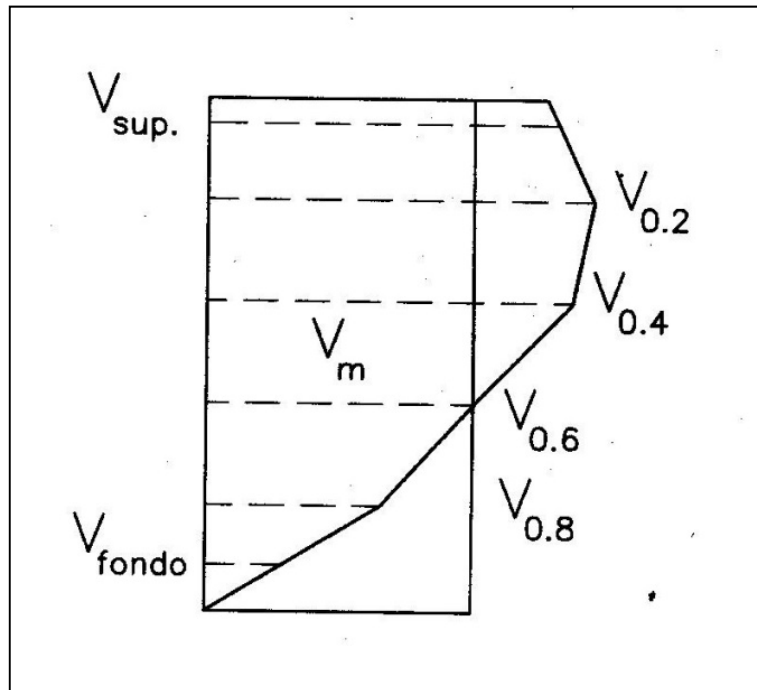


Fuente: elaboración propia.

e) Método de seis puntos. Este método se puede utilizar en condiciones difíciles, cuando por ejemplo hay vegetación acuática. La velocidad se mide colocando el molinete en cada vertical a 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 de profundidad a partir de la superficie y tan cerca como sea posible de la superficie y del lecho. Los valores de la velocidad se trazan en un gráfico y la velocidad media se determina como en el método de distribución de velocidad o mediante la ecuación:

$$\bar{V} = 0.10 \cdot (V_{\text{superficie}} + 2 \cdot V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.4} + 2 \cdot V_{0.6} + 2 \cdot V_{0.8} + V_{\text{lecho}})$$

Figura 13. Método de seis puntos.



Fuente: elaboración propia.

La exactitud de un método en particular debe determinarse al medir, si es posible, la velocidad en unos seis a diez puntos en cada vertical para las primeras mediciones de caudal efectuadas en un nuevo sitio. De ser posible, pueden efectuarse mediciones que dividan la vertical en diez puntos, esto se hace cuando se va a aforar por primera vez una corriente, con el fin de conocer el comportamiento de la velocidad media total de la sección respecto a la velocidad superficial, $K = V_m/V_s$.

2.2.4.3 Método de integración

Para este método el molinete se baja y se sube a través de toda la profundidad en cada vertical a una velocidad uniforme. La velocidad a la que se sube o se baja el molinete no debe ser superior al 5% de la velocidad media del flujo y en ningún momento debe ser menor a 0.04 m/s y superior a 0.10 m/s. Se determina el número promedio de revoluciones por segundo. Se deben realizar dos ciclos completos de medición en cada vertical y si los resultados obtenidos difieren en más del 10%, la operación (dos ciclos completos) debe repetirse hasta que los resultados obtenidos estén dentro de este límite. Este método se utiliza rara vez en aguas con una profundidad superior a tres metros y velocidades inferiores a 1 m/s, generalmente no se usa para corrientes con profundidades menores de 1 m.

El método de integración arroja buenos resultados si el tiempo de medición es suficiente (60 a 100 segundos). Con un molinete de hélices, la velocidad promedio se puede leer de la tabla de calibración del instrumento según el número promedio de revoluciones (siendo calculada como el número total de revoluciones dividido por el tiempo total empleado en la medición en la vertical). Se deben evitar las incertidumbres introducidas por el uso de molinetes que poseen más de una ecuación. Cuando se usa una barra de sondeo o un lastre en cualquiera de los tipos de aforo no será posible medir la velocidad cerca de la superficie y del fondo del canal. Una estimación del caudal por unidad de ancho para esta zona se puede obtener de la ecuación:

$$q_u = 2 \frac{V_m \times h_f}{3}$$

Donde:

q_u = caudal por unidad de ancho sobre la zona de medición (m^3/s)

V_m = velocidad media para la parte medida de la vertical (m/s)

h_f = profundidad de la zona no medida (m)

De manera similar, el caudal por unidad de ancho para la zona no medida cercana a la superficie se obtiene de la ecuación:

$$q_u = 2 \frac{V_m \times h_s}{3}$$

Donde:

q_s = caudal por unidad de ancho sobre la zona no medida ($m^3/s \cdot m$)

h_s = profundidad de la zona no medida (m)

En la medida de lo posible, los equipos de medición se deben seleccionar adecuadamente para disminuir la profundidad de las zonas no medidas.

2.2.4.4 Método superficial

Este método se utiliza en condiciones especiales donde no es posible aplicar los otros métodos, la profundidad del molinete para la medición de la velocidad puede ser uniforme en todas las verticales, asegurándose de que las observaciones no sean afectadas por olas producidas por el viento. Se realizan mediciones de velocidad 20 cm por debajo de la superficie del agua, este método se utiliza para medir la velocidad en las crecientes, las cuales no permiten efectuar un aforo convencional, y en esta forma proteger los técnicos y el equipo hidrométrico. Este caso específico se utiliza el factor de conversión "K", para convertir la velocidad superficial a media en la vertical.

El coeficiente “K” se puede calcular para las estaciones correlacionando la velocidad superficial con la velocidad al 60% de la profundidad, o donde se requiera una mayor precisión con la velocidad media obtenida por algún otro método. Si lo anterior no es posible de realizar o no se cuenta con datos de aforos anteriores y por consiguiente no se han calculado factores de conversión para cada uno de los aforos, como guía general puede considerarse que el coeficiente varía entre 0.84 y 0.90, dependiendo de la forma del perfil de velocidades. Valores entre 0.88 y 0.90 se obtienen cuando la rugosidad del lecho del río es baja. El empleo de molinetes cerca de la superficie libre del agua, o del lecho del río debe estar de acuerdo con las instrucciones de uso de los equipos dadas por los fabricantes.

2.2.5 Determinación del caudal

2.2.5.1 Métodos aritméticos

a) Método de la sección media: se considera que la sección transversal está compuesta de un número de segmentos, cada uno de ellos limitados por dos verticales adyacentes. Si \bar{V}_1 es la velocidad media en la primera vertical y \bar{V}_2 la velocidad media de la vertical adyacente (figura 8), y si “ d_1 ” y “ d_2 ” representan las profundidades totales respectivas en las verticales 1 y 2, y “ b ” es la distancia horizontal entre las verticales, entonces el caudal “ q ” del segmento será:

$$q = \left(\frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2}{2} \right) \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot b$$

El caudal total se obtiene sumando el resultado de los caudales parciales. Referenciado a la figura 14, el método de la sección media se trabaja para el segmento “5 -6” por medio de la ecuación:

$$q_{5-6} = \left(\frac{\bar{V}_5 + \bar{V}_6}{2} \right) \cdot \left(\frac{d_5 + d_6}{2} \right) \cdot (b_6 - b_5)$$

Donde:

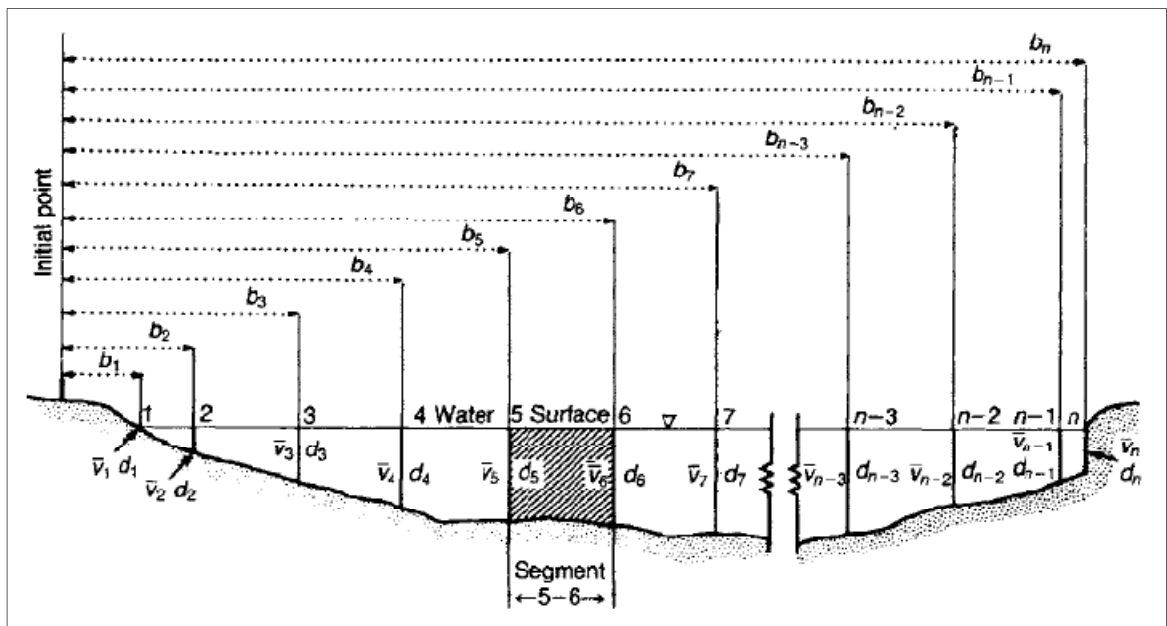
q_{5-6} = caudal del segmento "5 - 6"

\bar{V}_5, \bar{V}_6 = velocidades medias en verticales "5" y "6"

b_5, b_6 = distancia del punto inicial en la banca a verticales "5" y "6"

d_5, d_6 = profundidad de las verticales "5" y "6"

Figura 14. Método de la sección media.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

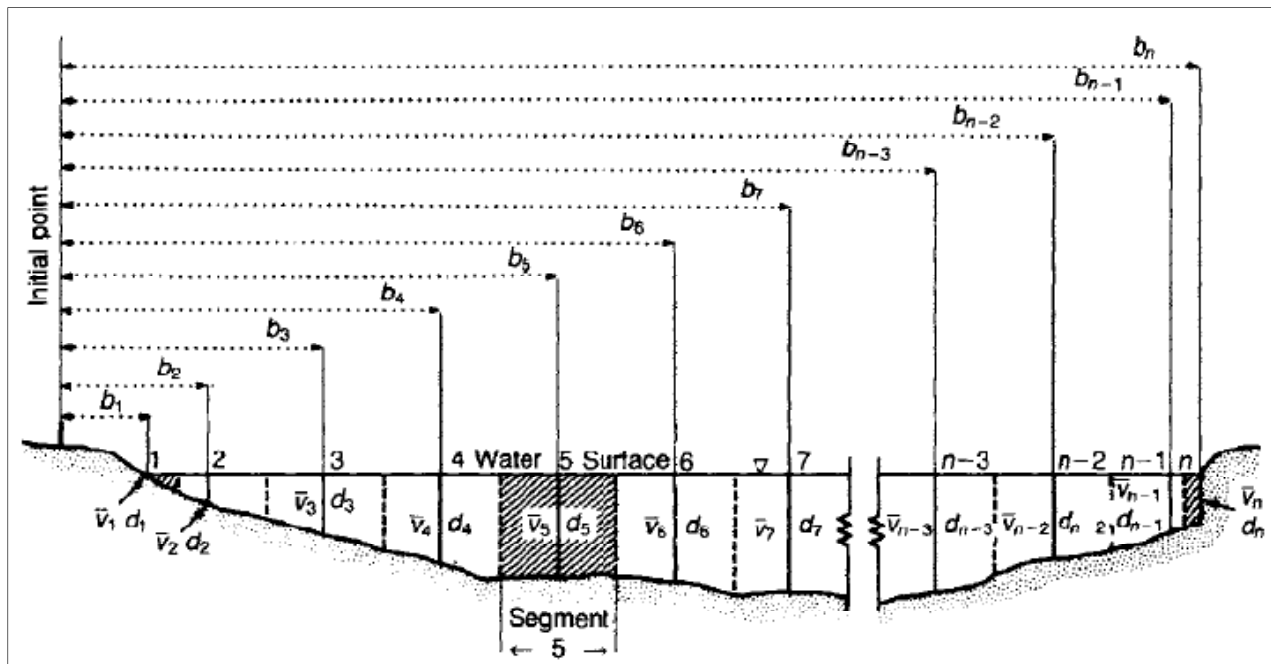
Puede notarse que la profundidad de flujo en la vertical "1" es cero y el problema de cálculo de caudal en los segmentos de los extremos no se plantea en este método.

La velocidad en las bancas puede ser tomada como aproximadamente igual a cero. El cálculo entonces para los demás segmentos de realiza de la misma forma que para el segmento “5 – 6”

b) Método de semisección: el caudal en cada segmento se calcula multiplicando “V·d” en cada vertical por el ancho, que es la suma de la mitad de la distancia entre verticales adyacentes. Puede evaluarse el valor de “d” en los dos medios anchos próximos a las márgenes. Con referencia a la figura 8, el caudal total “Q” se calculará de la siguiente manera:

$$Q = \bar{V}_1 \cdot d_1 \cdot \left(\frac{b_2 + b_1}{2} \right) + \bar{V}_2 \cdot d_2 \cdot \left(\frac{b_3 + b_1}{2} \right) + \dots + \bar{V}_n \cdot d_n \cdot \left(\frac{b_n + b_{(n-1)}}{2} \right)$$

Figura 15. Método de la semisección.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

Si se toma como referencia la figura 15 para el método de la semisección, por ejemplo para determinar el caudal en el segmento número “5”, puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$q_5 = \bar{V}_5 \cdot \left[\frac{(b_5 - b_4) + (b_6 - b_5)}{2} \right] \cdot d_5 = \bar{V}_5 \cdot \left(\frac{b_6 - b_4}{2} \right) \cdot d_5$$

Donde:

q_5 = caudal del segmento “5”

\bar{V}_5 = velocidad media en la vertical “5”

b_4, b_5, b_6 = distancia del punto inicial en la banca a verticales “4”, “5” y “6”

d_5 = profundidad de la vertical “5”

Para los caudales “ q_1 ” y “ q_n ” las ecuaciones quedan de la forma:

$$q_1 = \bar{V}_1 \cdot \left(\frac{b_2 - b_1}{2} \right) \cdot d_1$$

$$q_n = \bar{V}_n \cdot \left(\frac{b_n - b_{n-1}}{2} \right) \cdot d_n$$

El segmento anterior en el comienzo de la sección transversal es por lo tanto, considerado coincidentemente con la vertical “1” y la siguiente vertical al final de la sección transversal está considerada coincidentemente con la vertical “n”. En la figura 15, “ q_1 ” es cero porque la profundidad de la vertical “1” es cero, sin embargo, cuando el perímetro de la sección transversal es vertical respecto a la superficie libre del agua, como el caso de “ q_n ”, la profundidad no es cero y la velocidad en la vertical puede ser tanto de valor igual a cero como mayor a cero.

Las ecuaciones para “q₁” y “q_n” son utilizadas cuando solo se tiene agua de un lado de la vertical, como en el caso de pilas de puentes, cambios abruptos o islas ubicadas en el cauce, es necesario estimar tales velocidades como un porcentaje de la velocidad de otra vertical, dado que es imposible ubicar un molinete en tales lugares, sin embargo puede ubicarse el molinete lo más cercano posible para tener un estimado de la velocidad en el perímetro. Sin embargo, si las verticales “2” y “n – 1” están ubicadas lo más cercanas posibles a las bancas y la sección transversal es amplia, a los caudales de los extremos puede restárseles importancia.

2.2.5.2 Métodos gráficos

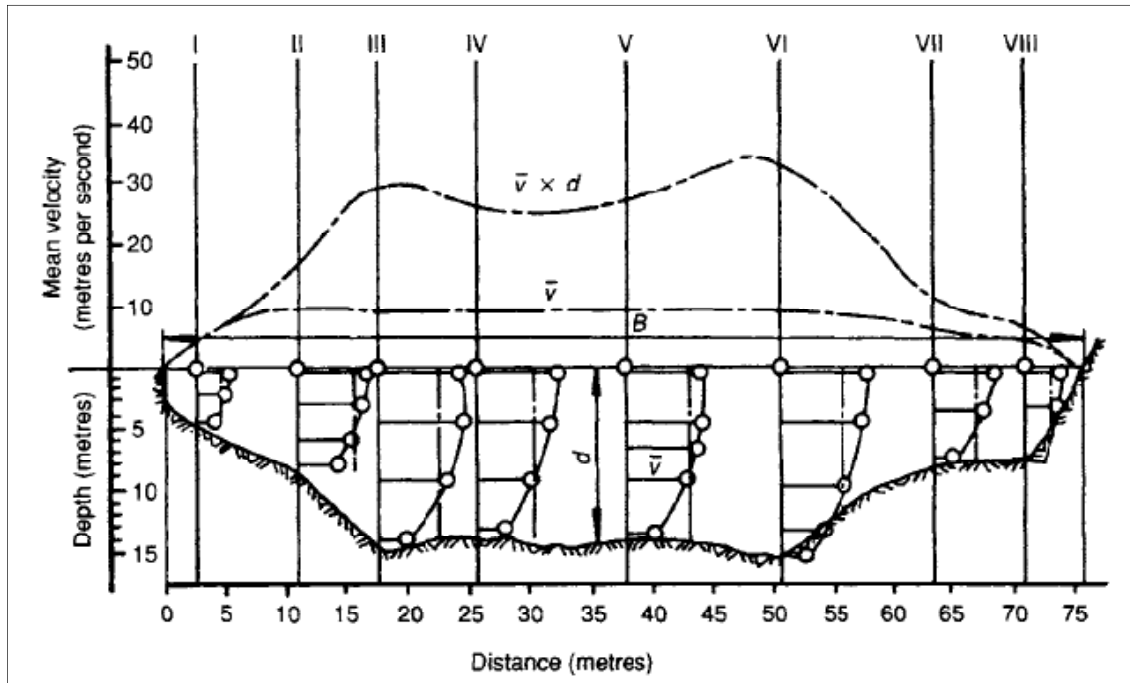
a) Método de integración de la curva profundidad – velocidad: el primer paso consiste en dibujar, para cada vertical, la curva profundidad – velocidad, cuya área representa el producto de la velocidad media por la profundidad total. El valor de este producto en cada vertical se lleva a un gráfico en función de la distancia lateral y se traza una curva a través de los puntos obtenidos.

El área definida por esta curva representa el caudal en la sección transversal. Las áreas contenidas por las curvas son mejor medidas de forma planimétrica, pero una determinación aritmética del área puede ser aceptable, ya sea por medio del uso de trapecios.

Para el método de integración de la curva profundidad – velocidad el caudal total puede definirse de la siguiente forma (figura 16):

$$Q = \sum_0^B \bar{V} \cdot d \cdot \Delta B$$

Figura 16. Integración de la curva profundidad – velocidad



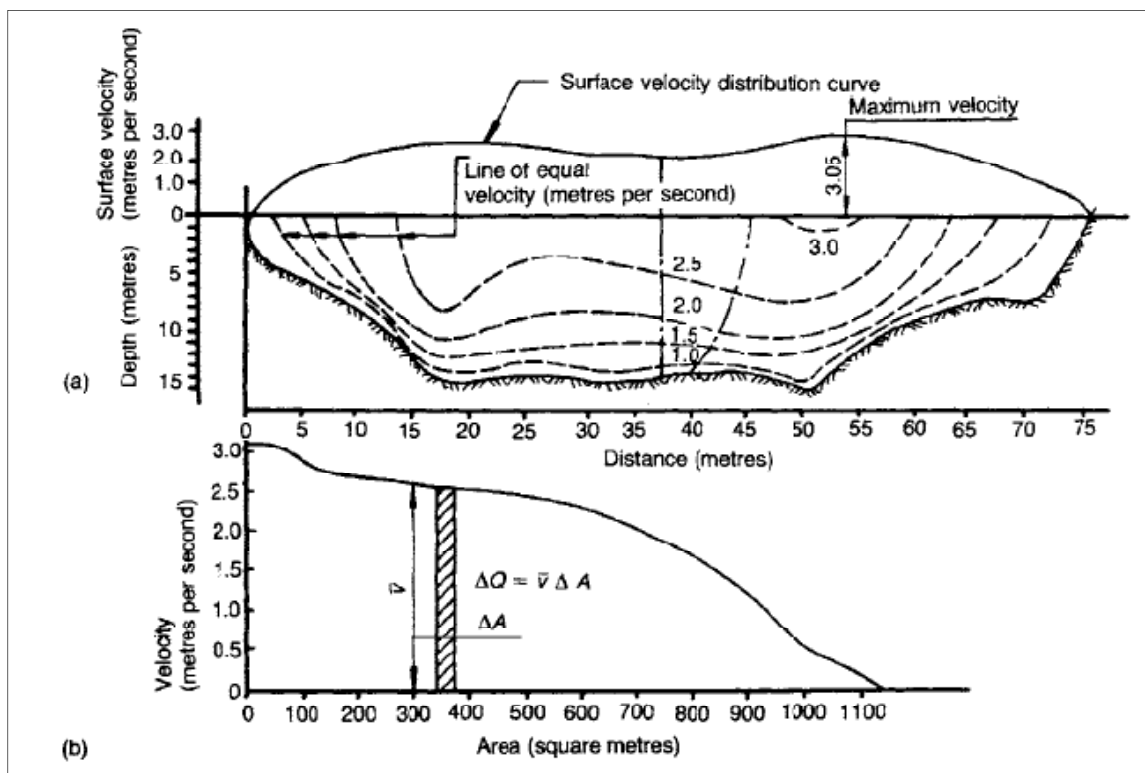
Fuente: Streamflow measurement, third edition.

b) Método de curvas de velocidad o de las isotacas: conocida la velocidad de la corriente en un número adecuado de puntos de la sección transversal, se dibujarán sobre ésta las curvas de igual velocidad o isotacas, de esta manera, determinando el área existente entre dos isotacas consecutivas y multiplicándola por la velocidad media de las isotacas correspondientes que la delimitan, se deduce de manera teóricamente exacta el volumen de agua que ha pasado en cada faja por unidad de tiempo, y la suma de todos estos volúmenes es el volumen total que en la misma unidad de tiempo atravesó la sección considerada, o sea el caudal buscado. Otra forma de determinar el caudal es la siguiente, las áreas delimitadas por las curvas de igual velocidad y la superficie del agua se deben medir y el valor obtenido se debe trazar en otro diagrama en el que las ordenadas indicarán la velocidad y las abscisas el área correspondiente.

La superficie delimitada por la curva área – velocidad representa el caudal en la sección transversal (ver figura 17), cuyo cálculo viene dado por la ecuación:

$$Q = \sum_0^A \bar{V} \cdot \Delta A$$

Figura 17. Curvas de velocidad o isotacas.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

En la práctica, este sistema de dibujar las isotacas es también utilizado cuando se busca conocer la conducta de las aguas en determinada sección de un río, principalmente cuando en ella se emplazan las pilas de un puente o se quiere estudiar fenómenos de sedimentación o erosión.

2.2.6 Exactitud del aforo con molinete

La exactitud depende de la fiabilidad de la calibración del molinete, de las condiciones del río y del número de mediciones de la profundidad y la velocidad que se hayan efectuado. El error típico para un nivel de confianza del 95 por ciento en este tipo de mediciones efectuadas en condiciones normales, es alrededor de un cinco por ciento. La precisión de las mediciones del caudal depende en gran parte del número de verticales en que se hagan mediciones de profundidad y velocidad, las verticales de observación deben identificarse de modo que se pueda definir debidamente la variación en elevación del lecho de la corriente y la variación horizontal en velocidad.

Deberá aumentarse el número de verticales cuando por primera vez se realicen mediciones en un nuevo emplazamiento, de modo que se pueda determinar con precisión la distribución de las velocidades en la sección. El molinete debería sacarse del agua a intervalos para ser examinado, generalmente cuando se pasa de una vertical a otra; en la cercanía de la velocidad mínima de uso, el error en la determinación de la velocidad se incrementa apreciablemente, con molinetes corrientes, la velocidad mínima para velocidades confiables es 0.15 m/s.

Los molinetes especiales que permiten la realización de mediciones confiables por debajo de la velocidad, pueden ser utilizados si han sido ensayados en esta escala de velocidades respecto a su repetición y precisión, antes de la medición. El eje horizontal del molinete no debe estar situado a una distancia menor que una vez o una vez y media la altura del rotor con respecto a la superficie del agua, ni deberá estar a una distancia menor que tres veces la altura del rotor desde la parte inferior del canal; además, ninguna parte del molinete deberá rozar la superficie del agua.

Cuando se miden velocidades por cualquiera de los métodos descritos se cometen errores de origen aleatorio o sistemático. Por consiguiente es conveniente determinar un orden de magnitud de este error de tal manera que se pueda estimar la incertidumbre total de la medición. Los errores pueden ser debidos a alguno(s) de los siguientes aspectos:

- El flujo es inestable, es decir el nivel de agua cambia apreciablemente durante la medición
- El material en suspensión interfiere el molinete, distorsionando el valor de velocidad
- La dirección del flujo no es paralela a la hélice del molinete
- Se usa un molinete para medir velocidades que se encuentran fuera de su rango de calibración (en algunos casos se mide con molinetes que poseen dos curvas de calibración, y esta condición no se tiene en cuenta al momento de medir)
- Los equipos para la medición (tales como barras de vadeo o cables de suspensión) son diferentes a los usados durante la calibración del molinete, en cuyo caso se introducen errores sistemáticos
- Es significativa la perturbación de la superficie libre del agua por acción del viento, o cualquier otra causa, cuando se va a medir la velocidad superficial
- El molinete no es sostenido de manera estable en el lugar correcto durante la medición.

Debido a que el mayor porcentaje de error en la obtención de un caudal por el método área – velocidad proviene principalmente de la medición de estos dos parámetros, y en especial el último, la forma como se obtenga la velocidad influirá notoriamente en los resultados finales. “Se sabe que la mayor fuente de incertidumbre en la medición de la velocidad se debe a los errores relacionados con la calibración de los molinetes” (ISO 1088, 1985).

2.3 Aforo con flotadores

Es el método más rudimentario para determinar la velocidad media de una corriente, pero también el más rápido y que requiere de menos elementos y preparativos. Se utiliza cuando no se puede emplear un molinete debido a velocidades o profundidades inadecuadas, a la presencia de material en suspensión, cuando la medición del caudal deba realizarse en un período de tiempo muy corto, o cuando no se dispone medios suficientes para realizar un aforo con mayor precisión como en el caso de puntas de avenida en ríos de régimen torrencial donde el tiempo de duración es corto. Deben usarse la mayor cantidad de flotadores posible, que cubran todo el ancho del río en franjas proporcionales. El equipo necesario para realizar un aforo de este tipo es el siguiente: flotadores, cinta métrica, cronómetro, formato para registro de datos de campo, radios portátiles. Se requieren dos técnicos

2.3.1 Selección del sitio

El aforo por flotadores se aplica en corrientes medianas y pequeñas en un tramo que tenga forma recta, y del cual se conozca su longitud (se recomiendan distancias mayores o iguales a 30 m). Se deben seleccionar tres secciones transversales en un tramo recto del curso de agua. Las secciones transversales deben estar lo suficientemente espaciadas entre sí de manera a medir con exactitud el tiempo necesario para que el flotador pase de una sección transversal a la siguiente. Se recomienda un lapso de 20 segundos, aunque podrán emplearse intervalos más breves en el caso de ríos pequeños en los que la corriente sea muy veloz y en los cuales es a menudo imposible seleccionar un tramo recto de longitud adecuada.

2.3.2 Normativas relacionadas con los aforos con flotadores

Tabla 3. Normativas e informes referentes al aforo con flotadores.

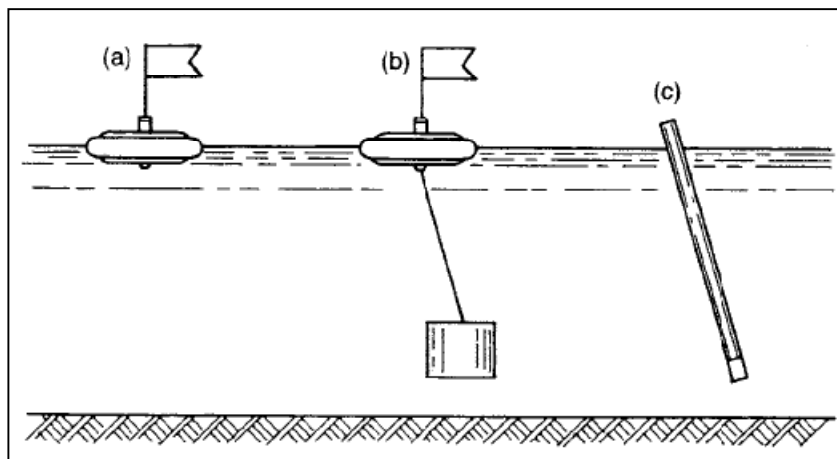
Normativa o informe	Contenido
Guía de prácticas hidrológicas de la OMM (OMM No. 168), Capítulo 11, inciso 11.3	Requerimientos para la realización de un aforo por medio de flotadores, procedimiento de campo y determinación de la velocidad media y caudal asociado con la sección transversal.

Fuente: elaboración propia, con base a información de la guía No. 168 de la OMM.

2.3.3 Tipos de flotadores

Se pueden utilizar flotadores de superficie, lastrados o subsuperficiales o de varilla (figura 18). Los flotadores de superficie deben sumergirse a una profundidad inferior a la cuarta parte de la profundidad del agua. No se deberán emplear cuando se tema que la medición pueda ser afectada por el viento. Los flotadores de varilla pueden sumergirse a una profundidad superior a la cuarta parte de la profundidad del río.

Figura 18. Tipos de flotadores.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

Los flotadores de varilla no deben rozar el lecho del canal. Durante los períodos en que las maniobras en el río pueden ser peligrosas, se pueden emplear, como flotadores naturales, restos de árboles que floten en el río, puede ser una botella lastrada, o incluso cuerpos flotantes transportados por las aguas de avenida. En general se puede utilizar cualquier elemento natural que esté en condiciones de flotar.

2.3.4 Procedimiento de medición

Se coloca el flotador en el centro de la corriente y se mide el tiempo “t” que necesita para recorrer una longitud “L”. En caso de utilizarse grupos de flotadores, estos deben estar distribuidos de tal forma que se pueda anotar su posición respecto a la banca o punto cero y tengan una distribución horizontal aproximada a las verticales, si se han realizado aforos con molinete anteriormente. Los flotadores deben distribuirse de manera uniforme a todo lo ancho de la corriente; se deben realizar entre 15 y 35 mediciones con flotadores. Cuando se usan flotadores naturales se deben hacer 20 mediciones como mínimo, en diversas posiciones de la sección del río. El flotador deberá lanzarse a suficiente distancia, aguas arriba de la sección transversal superior, para que pueda alcanzar una velocidad constante antes de llegar a la primera sección transversal.

El tiempo en que el flotador atraviesa cada una de las tres secciones transversales se registrará por medio de un cronómetro. Este procedimiento se debe repetir con cada uno de los flotadores distribuidos a todo lo largo de la corriente. La distancia entre el flotador y la orilla al paso de cada una de las secciones transversales puede ser determinada mediante métodos ópticos adecuados, por ejemplo con un teodolito.

La profundidad de la corriente en ciertos puntos en la sección transversal se puede determinar mediante métodos de topografía. El tramo de aforo debe ser recto.

2.3.5 Medición de la velocidad

La velocidad superficial, “ V_s ”, está dada por la ecuación:

$$V_s = L/t$$

La velocidad media de la corriente en la sección transversal es igual a la velocidad en superficial multiplicada por un coeficiente “ K ”, cuyo valor se deduce, si es posible, de las medidas anteriores hechas con un molinete para caudales más pequeños. El valor del factor “ K ” puede variar entre 0.60 y 0.85, dependiendo de la profundidad del cauce, forma del perfil vertical de velocidades, profundidad de inmersión del flotador y de la rugosidad de su fondo y orillas. Algunos autores también recomiendan que la relación “ $K = \bar{V}/V_s$ ” varía entre 0.80 y 1.05, siendo mayor cuando mayor es la turbulencia y la pendiente, y adoptando los valores más pequeños para corrientes de poca velocidad y pendientes débiles. Si se han realizado medidas con flotadores en varios puntos de la sección se toma un valor medio, “ \bar{V}/V_s ” varía entre 0.80 y 0.95. Si se toma la velocidad máxima en el perfil la relación varía entre 0.55 y 0.90. Los valores más altos del factor son por lo general obtenidos para un río con lecho llano. El valor de “ K ” también varía dependiendo del tipo de flotador, para flotadores lastrados o de varilla este valor es muy cercano o igual a uno cuando el flotador se ubica al 60% de la profundidad. Este coeficiente puede ser estimado utilizando las ecuaciones de Manning y Chezy. Además de la velocidad hay que tomar la referencia del nivel alcanzado, para levantar el perfil transversal una vez pasada la avenida.

Dicho perfil transversal debe representar una media de los perfiles transversales en el tramo donde se midió la velocidad. El factor “K” que debe aplicarse a la velocidad medida se debe determinar en lo posible, para cada sitio. Cuando no se disponga de mediciones hechas por medio de molinete, se puede utilizar un factor “F” de ajuste según la tabla 4 para una estimación aproximada.

Tabla 4. Factor “F” de ajuste de la velocidad del flotador en función de la relación “R”, entre la profundidad de inmersión del flotador y la profundidad del agua

R	F
0.10 o menos	0.86
0.25	0.88
0.50	0.90
0.75	0.94
0.95	0.98

Fuente: guía No. 168 de la OMM.

Cuando se usan flotadores naturales, se deben trazar en un gráfico las velocidades en función de la distancia a la que se encuentran de la orilla, lo que permitirá determinar la velocidad media en la superficie del río. El uso de grupos de flotadores se hace con el objetivo de medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal, para luego hallar la velocidad media en cada franja en que se ha dividido dicha sección. Una variante es que conociendo la velocidad superficial, “ V_s ” del flotador, y el perfil de velocidades para cada vertical (por medio de aforos anteriores) pueden estimarse los valores de las velocidades a diferentes profundidades y utilizar los métodos descritos para el aforo con molinete.

2.3.6 Determinación del caudal

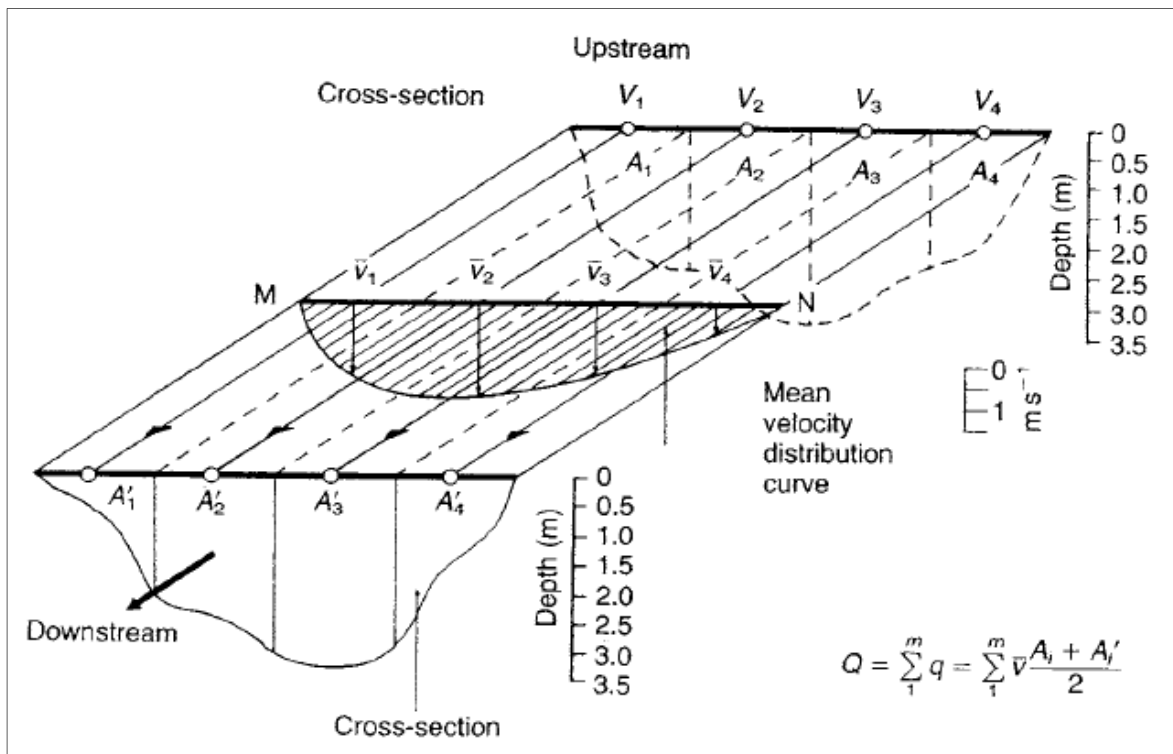
El caudal en cada sección, se calcula multiplicando la sección transversal media por la velocidad media del flujo en la sección. El caudal total será igual a la suma de caudales de cada una de las secciones. Un tipo de determinación del caudal por medio de flotadores se muestra en la figura 19, donde la sección transversal superior e inferior se encuentran divididas en el mismo número de segmentos de igual ancho cada uno. El número mínimo de segmentos puede ser cuatro, pero preferiblemente pueden ser más, si el canal es muy irregular, cada segmento debe tener aproximadamente el mismo caudal en lugar de tener igual ancho. Utilizando promedios, las áreas de los segmentos pueden ser determinadas.

Para el caso de la figura 19, se dibuja una línea "MN", paralela a las líneas de las secciones transversales, los puntos de inicio y final para cada flotador son luego ubicados y unidos por líneas entre sí, los puntos superficiales que determinan el ancho de cada segmento se unen por medio de líneas puntuadas. Cuando las líneas de recorrido de cada flotador cruzan la línea "MN", la velocidad media correspondiente (velocidad del flotador multiplicada por el coeficiente "K" apropiado) es graficada normal a "MN" y al unirse los diferentes puntos se obtiene una curva de distribución de velocidades. A partir de esta curva la velocidad media para cada segmento puede ser determinada por método planimétrico o puede adoptarse un valor aproximado igual a la velocidad a mitad del recorrido a través del segmento. El método para obtención del caudal es similar al utilizado en el caso de aforo por molinete. Las zonas medias de los segmentos correspondientes de la parte superior e inferior de las secciones transversales se multiplican por la velocidad media. La ecuación para determinar el caudal en este caso es:

$$Q = \sum_1^m q_i = \sum_1^m \bar{v} \cdot \frac{A_1 + A_1'}{2}$$

Cuando no es posible obtener un movimiento uniforme o satisfactorio del flotador en su segmento correspondiente o éste se desplaza hacia el centro del cauce, un caudal no ajustado se puede determinar calculando la media de las velocidades superficiales. El caudal no ajustado es entonces multiplicado por el coeficiente apropiado u obtenido por medio de aforos realizados con molinete, teniéndose entonces el caudal medio del cauce.

Figura 19. Medición de la velocidad y determinación del caudal en el aforo con flotadores.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

2.3.7 Exactitud del aforo con flotadores

Este método es utilizable cuando se dispone de poco tiempo para la medición, por lo tanto es más preciso si se dispone de datos de aforos anteriores y de factores “K” obtenidos en los mismos. No es utilizable en cauces de perfil irregular o de muy poca profundidad, pero da resultados aceptables si se escoge un tramo relativamente recto y de sección uniforme. Una de las principales fuentes de error de este método consiste en que en ocasiones el flotador no sigue una ruta determinada sino más bien errática en la superficie, por lo que resultaría recorriendo una distancia mayor a la del tramo establecido, obteniéndose datos de velocidades inexactas y teniendo que recurrirse a un valor de velocidad superficial y caudal no ajustado para luego calcular el valor del caudal que atraviesa la sección transversal con la aplicación del factor “K”.

2.4 Aforos con trazadores

Estos aforos, también llamados aforos químicos, se basan en la variación de concentración que experimenta una disolución al ser vertida sobre el cauce de un río en el cual circula un caudal de “Q” que es el que se trata de determinar. Existen dos grupos de aforos con trazadores dependiendo del tiempo de duración de la inyección del mismo, aforos a régimen constante o de inyección continua (tiempo de aforo dado) y aforos por integración o de inyección instantánea (una sola dosis), resultan particularmente idóneos para los pequeños arroyos de montaña, donde debido a la rapidez de la corriente y a la escasa profundidad del cauce no se puede utilizar con éxito un molinete. Las condiciones generales son iguales para ambos grupos de aforos con trazadores.

Estos aforos se recomiendan para lugares donde no se puedan emplear los métodos tradicionales, debido a la poca profundidad de la corriente, a grandes velocidades, turbulencia excesiva, régimen torrencial, alta pendiente, lechos inestables, líneas de flujo desordenadas en las secciones de aforo o presencia de sedimentos. Para calcular el caudal se inyecta en el curso de agua una solución de un producto químico, de concentración conocida y aguas abajo, a una distancia suficiente para que el producto se haya mezclado completamente, se recogen las muestras de agua a cortos intervalos de tiempo y analizándolas en laboratorio para determinar su concentración, se construye entonces una curva concentración contra tiempo, en todo este desarrollo no se requiere conocer el área de la sección de medición. Puede trabajarse con soluciones de cloruro sódico, cuya concentración aguas abajo viene dada por la variación de la conductibilidad eléctrica del agua en el tiempo. Se define como trazador a toda sustancia que incorporada a un proceso físico o químico permita estudiar su comportamiento y evolución. Entre los trazadores empleados pueden citarse los sólidos en suspensión, los trazadores químicos solubles en el medio bajo estudio, los colorantes y los elementos radioactivos. Para este tipo de aforo se requiere del conocimiento de los siguientes factores:

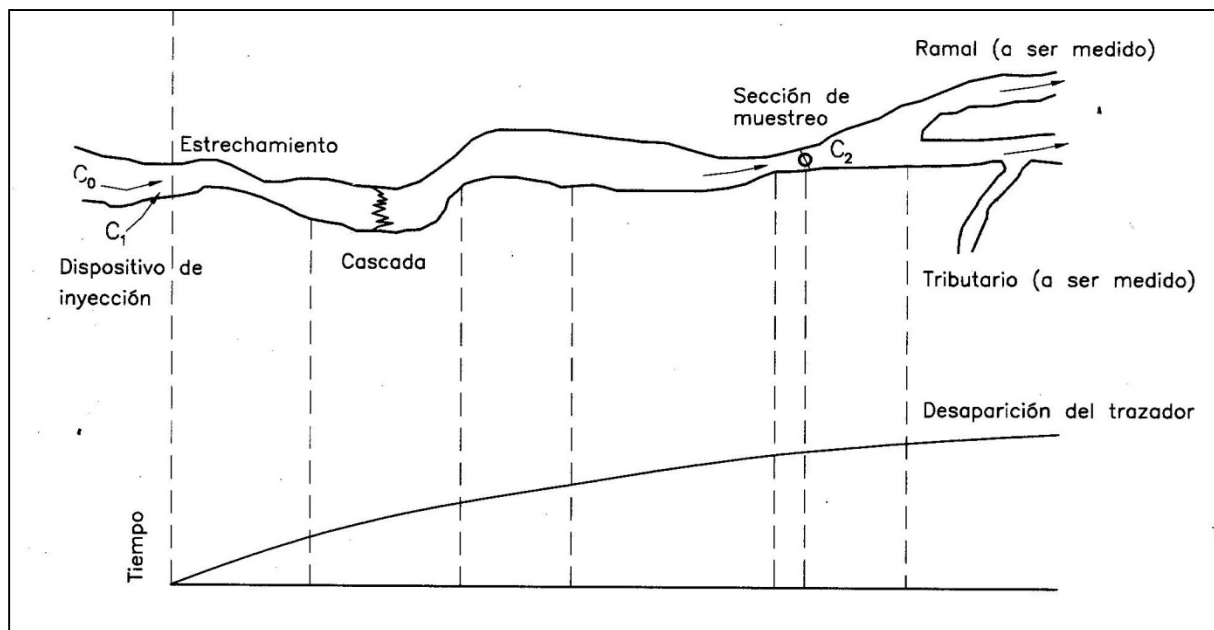
- a) El coeficiente de inyección para el método de inyección a ritmo constante o la cantidad total inyectada para el método de inyección instantánea.
- b) La concentración del trazador en la solución inyectada.
- c) La concentración del trazador en la corriente después de que se haya diluido completamente en toda la sección transversal.

2.4.1 Selección del sitio

El criterio fundamental de selección del sitio, es la mezcla adecuada de la solución inyectada con el agua de la corriente en un pequeño tramo del canal.

La mezcla se mejora por la fuerte rugosidad de las orillas elevadas y las características del terreno, el tramo elegido debe ser tal que el flujo del canal sea muy turbulento, como cascadas, curvas o estrangulamientos abruptos del curso de agua; debe carecer de zonas donde haya agua estancada (ver figura 20). Cuanto más grande es la relación profundidad – ancho, menor es la distancia necesaria para obtener una mezcla adecuada. La longitud del tramo debe ser lo más corto como sea posible, pero en ríos largos puede ser de algunos kilómetros. En cualquier evento la longitud debe ser aproximadamente igual a la longitud de mezcla como mínimo. Las zonas con vegetación y donde el río se bifurca en ramales deben evitarse. En todos los casos es aconsejable realizar la inyección en una zona de alta velocidad.

Figura 20. Selección del sitio para aforo por trazadores.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

La distancia “L” requerida entre el lugar donde se inyecta la solución y la sección de muestreo será:

$$L = 0.13 \cdot C \cdot \frac{(0.7 \cdot C + 6)}{g} \cdot \frac{b^2}{\bar{d}}$$

Donde:

C = coeficiente de Chezy para el tramo

g = aceleración de la gravedad

b = ancho medio de la sección transversal

\bar{d} = profundidad media de la corriente

También puede utilizarse la ecuación empírica:

$$L = b \cdot Q^{1/3}$$

Donde:

L = longitud de muestreo (en metros)

Q = caudal aproximado

b = 14 para inyección a mitad del cauce, 60 para inyección desde la banca

2.4.2 Normativas relacionadas con los aforos con trazadores

Tabla 5. Normativas e informes referentes al aforo con trazadores.

Normativa o informe	Contenido
Guía de prácticas hidrológicas de la OMM (OMM No. 168), Capítulo 11, inciso 11.4	Condiciones y requerimientos necesarios para un aforo por medio de trazadores

Normativa o informe	Contenido
Publicación del USGS, <i>Chapter A9, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Measurement of time of travel in streams by dye tracing.</i>	Utilización de colorante como trazador.
Publicación del USGS, <i>Chapter A16, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Measurement of discharge using tracers.</i>	Preparación del trazador, métodos de recolección de muestras, equipo necesario, recolección de datos para los diferentes tipos de inyección, métodos alternativos de medición.
Organización internacional de normalización, 1973: <i>Liquid flow measurement in open channels: Dilution methods for measurement of steady flow. Part 1: Constant rate injection method.</i> ISO 555, Ginebra, Suiza.	Método de dilución constante o continua en flujo permanente.
Organización internacional de normalización, 1987: <i>Liquid Flow Measurement in open channels: Dilution methods for measurement of steady flow. Part 2: Integration method.</i> ISO 555, Ginebra, Suiza.	Método de dilución instantánea o puntual en flujo permanente.

Normativa o informe	Contenido
Organización internacional de normalización, 1994: <i>Liquid flow measurement in open channels: Dilution methods – General</i> . ISO 9555/1, Ginebra, Suiza.	Generalidades para los métodos de dilución.
Organización internacional de normalización, 1993: <i>Liquid flow measurement in open channels: Dilution methods - Chemical tracers</i> . ISO 9555/3, Ginebra, Suiza.	Norma para el uso de trazadores químicos

Fuente: elaboración propia, con base a información de la guía No. 168 de la OMM y bibliografía referenciada en el libro *Streamflow Measurement, Third edition*.

2.4.3 Trazadores y equipo de detección

Se puede utilizar como trazador cualquier sustancia que reúna las siguientes características:

- a) Debe poder disolverse rápidamente en el agua de la corriente a temperaturas normales.
- b) No debe encontrarse normalmente presente en el agua del río o sólo en cantidades ínfimas.
- c) No debe descomponerse en el agua del río, ni debe ser retenida o absorbida por sedimentos, plantas u organismos, recipientes o el perímetro de la sección transversal.
- d) No debe reaccionar químicamente con cualquier superficie.
- e) Su concentración debe poder ser medida en forma exacta por métodos sencillos.
- f) Debe ser inofensiva para el hombre, los animales y la vegetación en las concentraciones que se utiliza y no debe contaminar el medio durante períodos prolongados.

- g) Su comportamiento debe ser idéntico al del medio a medir, en este caso agua, siendo necesario que se desplace a igual velocidad, esto implica que no debe efectuar intercambio iónico y no debe tampoco sufrir absorción química o física, además de no alterar las propiedades y condiciones del agua; tales como densidad, viscosidad y temperatura.
- h) Si la sustancia trazadora se inyecta artificialmente al flujo, este no debe contener cantidades apreciables de la sustancia inyectada.
- i) Es conveniente que sea fácilmente soluble en agua y no se precipite, permitiendo marcar grandes cantidades de fluido con una pequeña masa de trazador.
- j) Es importante que pueda ser medido "in situ".
- k) Es importante que su costo sea reducido.

Solamente un trazador ideal puede cumplir con todos estos requerimientos por lo que se hace indispensable tener un conocimiento práctico de cada uno de estos, para utilizar el apropiado de acuerdo a la necesidad del estudio y a las características morfométricas, y físicas y químicas del cauce y el agua de la corriente. La sustancia trazadora más económica es la sal común, preferiblemente de grano fino; la cantidad de sal requerida por m^3/s dependerá de la longitud de mezcla. Un tramo largo requiere más sal que un tramo corto, 0.2 kg de sal por m^3/s se considera suficiente para aguas naturales con baja conductividad. Bajo buenas condiciones, sin embargo, caudales mayores a 140 m^3/s necesitan del orden de 12 kg. También pueden utilizarse colorantes como el dicromato de sodio o el permanganato de potasio, a los cuales también puede determinárseles la concentración por métodos colorimétricos. Las concentraciones mínimas de sal se pueden medir con una precisión del orden de $\pm 1\%$ por medio del método de medición de conductividad; la tabla 6 muestra la concentración de sal que puede ser detectada en función de la conductividad del agua del cauce.

Cuando el cauce tiene una conductividad muy baja, la concentración mínima puede ser reducida un 10% de lo que se indica en la tabla 6. La sal común tiene una solubilidad de 3.6 kg para 10 litros a 15 °C, pero bajo condiciones de campo, se utilizan no más de 2.5 kg generalmente para 10 litros. La concentración mínima en la que debe estar la sal aguas abajo del punto de inyección es de 2.0 mg/l (0.002 kg/m³).

Tabla 6. Concentraciones mínimas de sal que pueden ser detectadas

	Conductividad natural del agua del cauce (μS x 10 ⁻³)			
	100	20	10	2
Concentración mínima de sal medible con una precisión de ± 1% (kg/m³ x 10⁻³)	10	2	1	1

Fuente: Streamflow measurement, third edition.

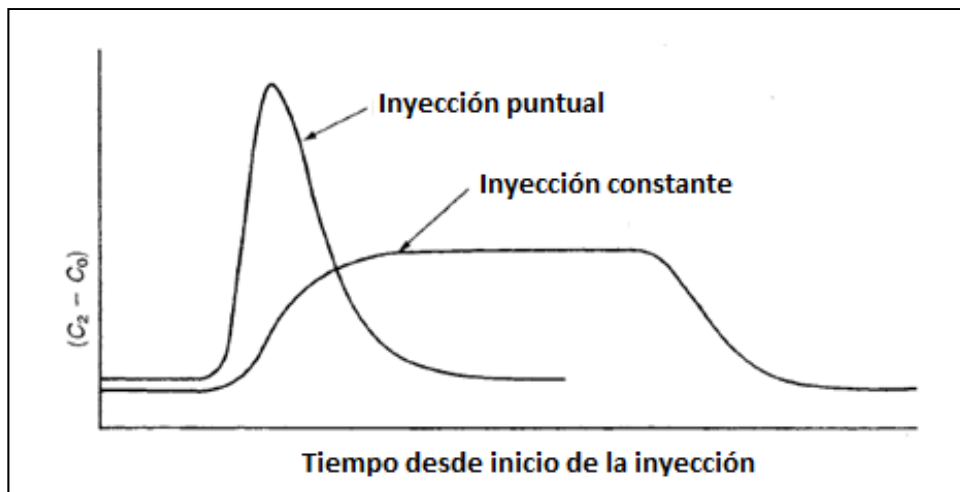
El análisis colorimétrico permite la medición de concentraciones muy bajas de dicromato de sodio, en caso de utilizarse, con concentraciones finales de 0.2 a 2 mg/l, la precisión de la medición depende de la concentración utilizada, y de la sensibilidad y precisión del aparato colorimétrico. Entre otro tipo de trazador para prueba colorimétrica se encuentra el permanganato de potasio.

En el caso de medirse la conductividad, el tiempo “T_i”, medido desde el momento de iniciarse de la inyección, hasta el instante en que comienza a pasar la onda, esta dado por la relación entre la distancia “L” y la velocidad “V_e” en m/s del agua, estimada previamente para el tramo definido:

$$T_i = \frac{L}{V_e}$$

El tiempo de muestreo (T) está dado por la sumatoria de los " Δt " constantes, empleados para la extracción de cada una de las muestras, para las cuales se emplean recipientes con capacidad de 100 mililitros; este tiempo va a depender, para el caso de inyección constante (figura 21), del tiempo que dure la inyección más el " T_i " y en el caso de inyección instantánea (figura 21), del tiempo que tarde en pasar totalmente la onda de trazador, aunque no se conoce una norma que defina con precisión, los intervalos de tiempo (Δt), normalmente se utilizan 10, 15, 20, 25 ó 30 segundos; lo importante es que se tomen el número de muestras necesarias para definir con precisión el comportamiento de las concentraciones durante el aforo.

Figura 21. Inyección constante y puntual.



Fuente: Streamflow measurement, third edition.

El equipo requerido para ejecutar un aforo por el método de dilución con sal es: trazador, conductímetro, cronómetro, cinta métrica, probetas, baldes graduados, frascos de 100 cm³, agua destilada, radios portátiles, formato para registro de datos de campo. Esta metodología es considerada una de las más adecuadas.

Sin embargo puede suceder que su ejecución sea difícil debido a la excesiva velocidad del agua o a la presencia de cuerpos extraños que pongan en peligro la integridad física de los aforadores o la seguridad del equipo hidrométrico empleado.

2.4.4 Aforos por inyección constante

Suponiendo que un río lleva un caudal constante “ Q_1 ” de agua con una muy débil concentración “ C_0 ” de determinada sustancia química. En la sección “ S_1 ” se vierte un caudal “ q ” constante, con una fuerte concentración “ C_1 ” de la misma sustancia química. Si esta inyección de disolución concentrada de concentración “ C_1 ”, se mantiene durante un tiempo suficiente largo, se establecerá un régimen permanente en otra sección “ S_2 ” aguas abajo, a suficiente distancia, y allí el caudal será “ $Q_2 = Q_1 + q$ ” y la concentración “ C_2 ” será menor que “ C_1 ” y mayor que “ C_0 ”. Es fácil establecer la ecuación de continuidad, en ausencia de tomas, fugas, aportes o infiltración entre los puntos “1” y “2”.

$$Q_1 \cdot C_0 + q \cdot C_1 = Q_2 \cdot C_2$$

$$Q_1 = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

En los casos comunes sucede que “ C_0 ” es despreciable y que “ C_2 ” tiene poca importancia frente a “ C_1 ”; así la fórmula práctica queda simplificada de la siguiente manera:

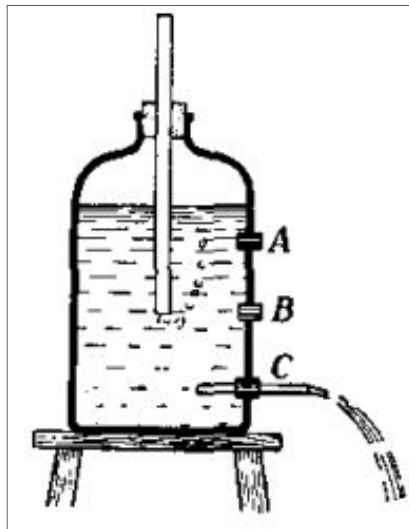
$$Q_1 = q \cdot \frac{C_1}{C_2}$$

Para realizar bien esta clase de aforos es indispensable tener la seguridad de que se cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Que en el lugar “S₂” de extracción de la muestra, la concentración presenta un régimen permanente, que permite la aplicación de la fórmula deducida.
- 2) Que el caudal “q” se mantenga también constante.

Para realizar la inyección a caudal constante se utilizan dos tipos de dispositivos. Cuando se trata de torrentes o ríos de poco caudal (menos de 500 l/s) el caudal “q” de inyección puede ser muy pequeño (del orden de milésimas de l/s).

Figura 22. Frasco Mariotte



Fuente: Custodio, Emilio; Hidrología subterránea.

Entonces la inyección puede realizarse mediante el frasco de Mariotte (figura 22), la carga que actúa para producir el caudal “q” es el desnivel “H” fijo entre los puntos “A” y “B”, puesto que en el punto “A” la carga es constante e igual a la presión atmosférica. En el caso de que los caudales del río son más importantes pasando ya de 1 m³/s, el frasco de Mariotte se hace insuficiente y es preciso recurrir a los inyectores llamados de nivel constante, que permiten aumentar el caudal “q” a valores de décima de segundo nutriendose de depósitos que pueden llegar al orden de 300 litros de capacidad y garantizando operaciones de hasta 10 y 15 minutos de duración entre el tiempo de inicio y final de la inyección.

2.4.5 Aforos por inyección puntual

Su fundamento radica en que si se vierte repentinamente en un cauce estrecho (con caudal “Q”, que es el que se quiere medir) un volumen “V” de disolución concentrada “C₁” con el peso “P” de sustancia química disuelta (P = C₁·V), se produce una nube expansiva que aumenta de dimensiones a medida que es transportada aguas abajo. Al situarse en un punto “S₂” del río, y allí extraerse “p” muestras a intervalos regulares “Δt”, en un tiempo “T = (p – 1)·Δt” desde que comienza el paso de la nube hasta que se termina, se obtendrá una serie de muestras, cuyas concentraciones “n₂” dibujadas en un sistema cartesiano (figura 21), darán una curva en forma de campana, siendo las abscisas los tiempos de extracción y las ordenadas las concentraciones “C₂” de cada una. El área de esta curva mide, en la escala adecuada el peso “p” de la sustancia arrojada al cauce (principalmente sal) en el lugar “S_i” de la inyección. La ecuación de continuidad se establece de la siguiente forma:

$$V \cdot C_1 = P = \left(Q + \frac{V}{T} \right) \cdot \int_0^T C_2 dt$$

Despreciando “V/T” en comparación con “Q”, se tiene:

$$P = Q \cdot \int_0^T C_2 dt$$

Donde se deduce:

$$Q = \frac{P}{\int_0^T C_2 dt}$$

La integral ha de comprender todo el tiempo “T” desde el principio hasta el final del paso de la nube. En el caso de considerar intervalos finitos de tiempo, la fórmula se transforma en:

$$Q = \frac{P}{\Delta t \cdot \sum C_2}$$

Donde “ Δt ” es el intervalo constante entre cada extracción de muestras, y “ \sum ” abarca el conjunto de todas ellas. Como siempre se supone que los intervalos “ Δt ” son todos iguales; el denominador de esta fórmula puede ser sustituido por el producto “T·C”, siendo “C” sensiblemente la concentración media de todas las muestras extraídas y “T” el tiempo total base de la onda.

La operación puede hacerse en la práctica de dos maneras: La primera sería extraer las “p” muestras a intervalos iguales y tomando volúmenes iguales de todas ellas mezclados después, para llevar al laboratorio solamente un volumen de concentración media “C” y hacer también un solo análisis, simplificando el trabajo y el transporte.

La segunda sería utilizar una pequeña bomba extractora a caudal constante y que llena la muestra en el tiempo de paso de la nube, comenzando a funcionar al principio y durante la totalidad de su transcurso. Con este sistema se realiza una verdadera integración, pero ello no quiere decir que es el método más exacto, puesto que depende en general, más de la meticulosidad y pulcritud de los trabajos, que de los sistemas empleados. Este sistema es rápido y útil cuando el cauce es bastante estrecho, a lo máximo 2 m si las aguas están muy batidas inclusive transversalmente, pues si no es así, la nube no es homogénea a lo ancho del cauce en el lugar de extracción, lo que es fundamentalmente para la validez de la ecuación de continuidad.

En el caso que la corriente contenga una concentración inicial del trazador, el caudal se determina por medio de la ecuación:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\int_0^T C dt - C_0 \cdot T}$$

Donde:

V = volumen de la solución inyectada

C₀ = concentración inicial o concentración natural de la corriente

C₁ = concentración de la solución inyectada

$\int_0^T C dt - C_0 \cdot T = C_3$ = concentración de trazador por unidad de tiempo = área entre la curva de la solución inyectada y la horizontal que representa la concentración natural.

T = tiempo total que tarda la solución en cruzar el punto de muestreo

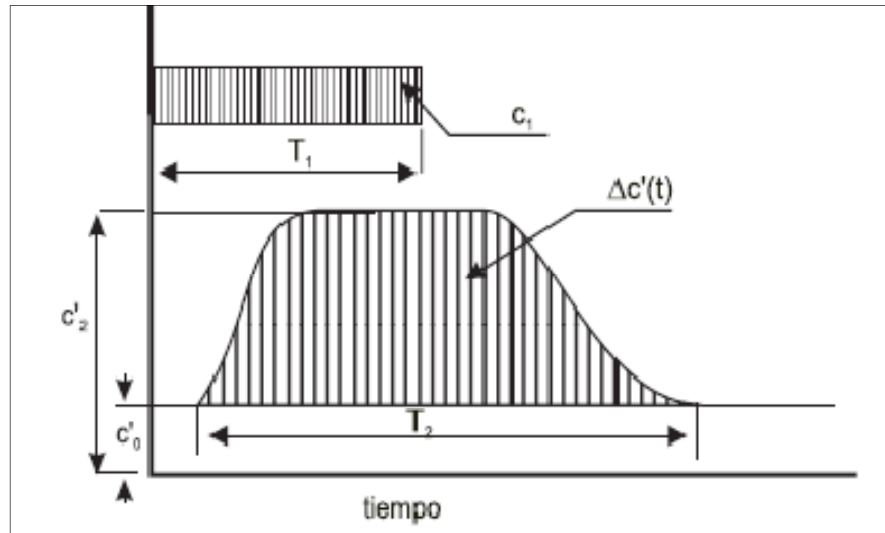
2.4.6 Determinación del caudal

En el caso de aforo por medio de la medición de concentración el caudal se determina por medio de las ecuaciones para los respectivos métodos de inyección. Otra forma de determinar el caudal, es el método desarrollado por Littlewood, y consiste en volcar en el cauce un volumen conocido, “V”, de una solución fuerte de sal común para medir aguas abajo, a cortos intervalos, el cambio de conductibilidad del agua. Así se construye una curva conductibilidad contra tiempo, como la de la figura 23, en la que la media de sus ordenadas, es la media de las diferencias de conductibilidad ($\Delta c' = c'_2 - c'_0$) de las muestras (c'_2) y del agua del río aguas arriba del punto de inyección (c'_0). Diluyendo en un recipiente un pequeño volumen “v” de la solución fuerte de sal común, en un volumen mucho mayor “V*” de agua y midiendo asimismo la diferencia de conductibilidad “ Δc^* ”, se puede calcular el caudal mediante la ecuación:

$$Q = \frac{V}{T_2} \cdot \frac{V^*}{v} \cdot \frac{\Delta c^*}{\Delta c'}$$

Cuyos términos son todos conocidos. El método no es sensible a la marca o calibración del aparato empleado para medir conductibilidades, ni se necesita conocer la concentración exacta de la solución fuerte, puesto que se trabaja con volúmenes y no con concentraciones. En el caso de no poderse tomar muestras, tanto para el método de conductividad como para el colorimétrico, puede delimitarse un tramo y medirse el tiempo necesario para que el trazador lo recorra, de manera similar a cuando se utilizan flotadores, siendo necesario detectar el momento en que la sal atraviesa el inicio y el final del tramo, y una inspección visual para determinar el tiempo de recorrido del colorante.

Figura 23. Curva de conductividad contra tiempo.



Fuente: Manual de pequeña hidráulica, comisión de las comunidades europeas.

2.4.7 Exactitud del aforo con trazadores

La exactitud de estos métodos depende sobre todo de una adecuada mezcla de la solución inyectada en toda la corriente de la sección transversal antes de llegar a la sección de muestreo. Si la solución trazadora se inyecta en forma continua, la concentración de esta solución deberá ser constante en toda la sección de medida. Si se inyecta toda la solución de forma instantánea, deberá ser la misma en todos los puntos de la sección.

La concentración debe determinarse en la sección de muestreo y como mínimo en otra sección transversal situada aguas abajo para verificar que no exista una diferencia sistemática en la concentración media de una y otra sección de muestreo. El método es muy preciso pero requiere un equipo costoso y personal especializado.

2.5 Otras normas relativas a la medición de caudal

Tabla 7. Normativas en informes referentes a la medición de caudales.

Normativa o informe	Contenido
Publicación del USGS, <i>Chapter A1, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, General field and office procedures for indirect discharge measurements.</i>	Procedimientos generales para recolección de datos de campo y cálculo de caudal.
Publicación del USGS, <i>Chapter A7, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Measurement of peak discharge by the slope – area method.</i>	Uso del método área – pendiente para la determinación de caudal pico en un tramo de río.
Publicación del USGS, <i>Chapter A7, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Stage measurement at gaging stations.</i>	Equipo para mediciones de la variación de nivel de un cauce en el tiempo.
Publicación del USGS, <i>Chapter A15, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Computation of water – surface profiles in open channels.</i>	Métodos para el trazo de perfiles de flujo en canales.
Publicación del USGS, <i>Chapter A17, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Acoustic velocity meters systems.</i>	Procedimientos para recolección de datos con correntómetros del tipo acústico.

Publicación del USGS, <i>Chapter A19, Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, Levels at streamflow gaging stations.</i>	Recolección de datos topográficos del lugar para la colocación de estaciones hidrométricas.
Organización internacional de normalización, 2007: <i>Hydrometry – Velocity – area methods using current – meters. Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement.</i> ISO 1088, Ginebra	Recolección y proceso de datos hidrométricos y la determinación de su incerteza
Organización internacional de normalización, 2008: <i>Hydrometry vocabulary and symbols 2008.</i> ISO 772, Ginebra, Suiza.	Vocabulario y simbología utilizados en la hidrometría.
Organización internacional de normalización, 2008: <i>Velocity area methods.</i> ISO 748, Ginebra, Suiza.	Métodos área – velocidad para la determinación de caudales.
Organización internacional de normalización, 1992: <i>Slope area method.</i> ISO 1070, Ginebra, Suiza.	Método área pendiente para la determinación de caudales.
Comité europeo de estandarización, 2007: <i>Hydrometric uncertainty guide 2007.</i> ISO/CEN 25377.	Guía para la determinación de la incerteza de datos hidrométricos.
Comité conjunto para guías en metrología, (<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>), 1995: <i>Guide to the expression of uncertainty (GUM).</i>	Análisis estadístico de datos para determinar su nivel de confianza e incerteza.

Fuente: elaboración propia, con base a información de la guía No. 168 de la OMM y bibliografía referenciada en el libro *Streamflow Measurement, Third edition.*

3. TOMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

3.1 Ubicación geográfica

Las mediciones se llevaron a cabo en la estación hidrométrica del río Cantil, ubicada dentro de la finca Sabana Grande, departamento de Escuintla, en las coordenadas 90°49'55" longitud Oeste y 14°21'55" latitud Norte a 654 MSNM.

3.2 Aforo por molinete

Se establecieron dos secciones aguas arriba, AR1 Y AR2 (tablas 8 y 9 y figuras 28, 29 y 30 del anexo) y una sección aguas abajo, AA (tabla 10 y figuras 28 y 31 del anexo) para toma de datos. Cada sección se dividió en diez segmentos, numerando las verticales de 0 – 10, coincidiendo las verticales 0 y 10 con las orillas de la sección. Para cada vertical se tomaron dos series de datos de revoluciones y tiempos, para la sección AR1, las series AR1.1 y AR1.2, para la sección AR2, las series AR2.1 y AR2.2, y para la sección AA, las series AA.1 y AA.2. Las profundidades a las cuales se tomaron datos de tiempo y el número de revoluciones fueron una muy cercana a la superficie, las otras a 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 de la profundidad y una muy cercana al lecho del río.

Tabla 8. Sección AR1.

VERTICAL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distancia a orilla	0.00	0.79	1.58	2.37	3.16	3.95	4.74	5.53	6.32	7.11	7.90
Profundidad	0.14	0.16	0.41	0.38	0.51	0.49	0.40	0.27	0.21	0.12	0.09

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 9. Sección AR2

VERTICAL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distancia a orilla	0.00	0.72	1.44	2.16	2.88	3.60	4.32	5.04	5.76	6.48	7.20
Profundidad	0.00	0.54	0.32	0.43	0.43	0.30	0.28	0.25	0.17	0.17	0.00

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 10. Sección AA.

VERTICAL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distancia a orilla	0.00	0.93	1.86	2.79	3.72	4.65	5.58	6.51	7.44	8.37	9.30
Profundidad	0.00	0.36	0.36	0.29	0.28	0.30	0.25	0.22	0.24	0.28	0.34

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

El molinete empleado fue un molinete de copas y su ecuación para determinar la velocidad de corriente en cada punto fue:

$$V = 0.6860 \cdot \text{Rev/s} + 0.0030$$

Donde:

V = velocidad de la corriente en m/s para cada punto

Rev/s = revoluciones por segundo (Rev/t)

Al momento de la medición de revoluciones en las verticales 0 y 10, el molinete se ubicó lo más cerca posible de las márgenes y del fondo, quedando el molinete a una distancia aproximada de 3.5 cm del fondo, y en el caso de no tenerse profundidad como en la vertical 0 para las secciones AR2 y AA, se colocó el molinete lo más cercano al borde y la superficie para tener una estimación de la velocidad cercana a dichos puntos.

A continuación se muestra como ejemplo de cálculo la primera serie de datos obtenidos para la vertical 4, sección AR2 (tabla 11; alturas y profundidades en metros y tiempos en segundos). Para cada profundidad de medición se tomaron tres datos de tiempo (t_1 , t_2 y t_3) para determinado número de revoluciones, de estos valores se obtuvo un tiempo promedio (t_{prom}), luego se calculó la velocidad angular en revoluciones por segundo, este valor de velocidad angular fue ingresado en la ecuación del molinete para obtener la velocidad de la corriente por cada altura.

Tabla 11. Datos vertical 4, sección AR2.1

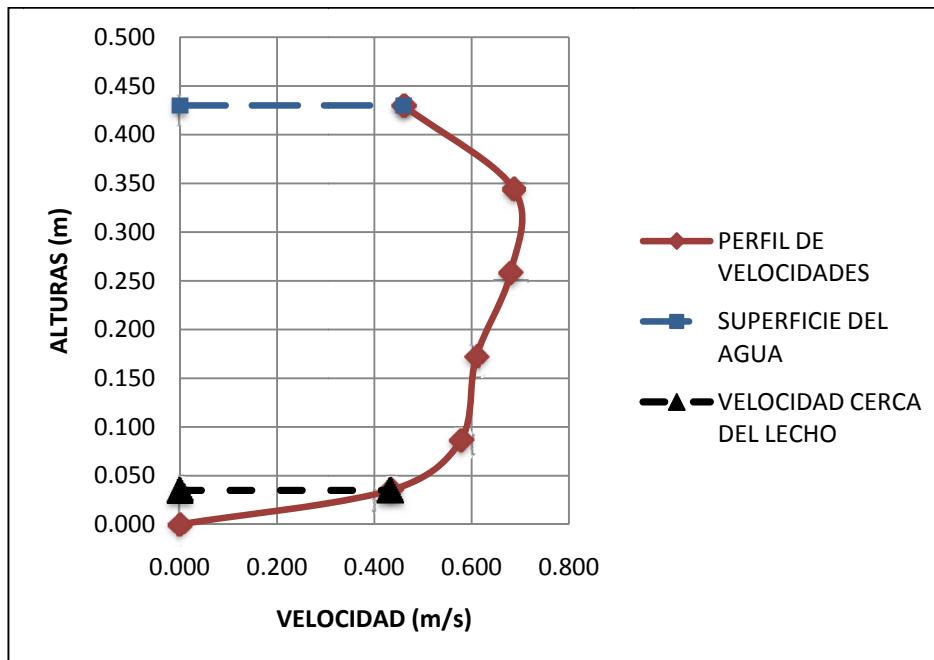
	Prof.	t_1	t_2	t_3	t_{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	22.48	22.53	22.60	22.54	15	0.666	0.460	0.430
0.2-H	0.086	15.08	15.07	15.00	15.05	15	0.997	0.687	0.344
0.4-H	0.172	15.24	15.28	15.09	15.20	15	0.987	0.680	0.258
0.6-H	0.258	16.85	17.04	17.02	16.97	15	0.884	0.609	0.172
0.8-H	0.344	12.00	11.85	11.99	11.95	10	0.837	0.577	0.086
Lecho	0.395	16.00	16.00	15.90	15.97	10	0.626	0.433	0.035

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

La figura 24 muestra la curva de distribución de velocidades de la vertical 4 de la sección AR2, el valor de la velocidad superficial utilizado fue el medido a una distancia muy cercana a la superficie. Luego de determinarse las velocidades, se calculó la velocidad media por medio de los diferentes métodos, un valor promedio de las velocidades en la vertical, el valor de la velocidad a 0.6 de profundidad, los métodos de dos, tres, cinco y seis puntos y el método gráfico de integración de la curva velocidad – profundidad (capítulo 2, incisos 2.2.4.2 y 2.2.5.2), con valor de m^2/s (área de la curva de la figura 24).

Posteriormente se calcularon las relaciones “ $K = V_m/V_s$ ”, dividiendo los valores de velocidad media de cada método (tabla 12) entre el valor de velocidad superficial de la tabla 11, estos valores de “K” (tabla 13), fueron posteriormente utilizados en el método de aforo por flotadores.

Figura 24. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AR2.1



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 12. Velocidades medias, vertical 4, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
$V_{promedio}$	0.574	m/s
V_m 1 pto. ($V_{0.6H}$)	0.609	m/s
V_m 2 ptos.	0.632	m/s
V_m 3 ptos.	0.621	m/s
V_m 5 ptos.	0.593	m/s
V_m 6 ptos.	0.600	m/s
V_m (método gráfico)	0.248	m ² /s

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 13. Relación V_m/V_s , vertical 4, sección AR2.1

	V_m/V_s
V_{promedio}	1.249
V_m 1 pto. ($V_{0.6H}$)	1.326
V_m 2 ptos.	1.375
V_m 3 ptos.	1.350
V_m 5 ptos.	1.291
V_m 6 ptos.	1.305

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Para encontrar los valores de caudal para cada método de determinación de velocidad se utilizaron los métodos de semisección, sección media y el método gráfico de la integración de la curva velocidad – profundidad (capítulo 2, incisos 2.2.5.1 y 2.2.5.2).

Método de la semisección para vertical 4:

$$q_4 = \bar{V}_4 \cdot \left(\frac{b_5 - b_3}{2} \right) \cdot d_4$$

Donde:

$\bar{V}_4 = V_m$ = velocidad media para vertical cuatro, para cada método utilizado

b_5 = distancia de la vertical 5 a la vertical 0 de la sección (orilla) = 3.60 m

b_3 = distancia de la vertical 3 a la vertical 0 de la sección (orilla) = 2.16 m

d_4 = profundidad de la vertical 4 = 0.43 m

Para la velocidad media determinada como velocidad promedio se tiene que el caudal para la vertical 4 es:

$$q_4 = 0.574 \cdot \left(\frac{3.60 - 2.16}{2} \right) \cdot 0.43 = 0.1778 \text{ m}^3/\text{s}$$

Los valores de caudal obtenidos para la vertical cuatro se muestran en la tabla 14. Los caudales para las verticales 0 y 10 se calcularon como:

$$q_1 = \bar{V}_1 \cdot \left(\frac{b_2 - b_1}{2} \right) \cdot d_1$$

$$q_{10} = \bar{V}_{10} \cdot \left(\frac{b_{10} - b_9}{2} \right) \cdot d_{10}$$

Tabla 14. Valores de caudal obtenidos para la vertical 4 por el método de semisección, sección AR2.1.

	$q_4 \text{ (m}^3/\text{s)}$
V_{promedio}	0.1778
$V_m \text{ 1 pto. (} V_{0.6H} \text{)}$	0.1887
$V_m \text{ 2 ptos.}$	0.1957
$V_m \text{ 3 ptos.}$	0.1922
$V_m \text{ 5 ptos.}$	0.1837
$V_m \text{ 6 ptos.}$	0.1857

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Para el método de la sección media, debido a su ecuación, se determina el caudal entre la vertical 4 y la vertical 5:

$$q_{4-5} = \left(\frac{\bar{V}_4 + \bar{V}_5}{2} \right) \cdot \left(\frac{d_4 + d_5}{2} \right) \cdot (b_5 - b_4)$$

Donde:

q_{4-5} = caudal del segmento "4 - 5"

$\bar{V}_4 = V_m$ = velocidad media para vertical 4 = 0.574 m/s

$\bar{V}_5 = V_m$ = velocidad media para vertical 5 = 0.518 m/s (tabla 106 del anexo)

b_4 = distancia de la vertical 4 a la vertical 0 de la sección (orilla) = 2.88 m

b_5 = distancia de la vertical 5 a la vertical 0 de la sección (orilla) = 3.60 m

d_4 = 0.43 m

d_5 = 0.30 m

Para las velocidades medias determinadas como velocidad promedio se tiene que el caudal para el segmento 4 - 5 es:

$$q_{4-5} = \left(\frac{0.574 + 0.518}{2} \right) \cdot \left(\frac{0.43 + 0.30}{2} \right) \cdot (3.60 - 2.88) = 0.1435 \text{ m}^3/\text{s}$$

La tabla 15 muestra los valores de caudal obtenidos para el segmento; dada la ecuación utilizada por el método, no se necesita de modificaciones para las verticales 0 y 10.

Tabla 15. Valores de caudal obtenidos para el segmento 4 - 5 por el método de sección media, sección AR2.1.

	$q_{(4-5)}$
V_{promedio}	0.1435
V_m 1 pto. ($V_{0.6H}$)	0.1258
V_m 2 ptos.	0.1613
V_m 3 ptos.	0.1436
V_m 5 ptos.	0.1440
V_m 6 ptos.	0.1480

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

En el método gráfico, por medio de trapecios se calculó el área entre verticales, teniendo en lugar de valores de profundidad, los valores de “ V_m ” en m^2/s ; para el caso del caudal entre verticales 4 y 5 se tiene que el valor de caudal circulante es:

$$q_{4-5} = \left(\frac{\bar{V}_4 + \bar{V}_5}{2} \right) \cdot (b_5 - b_4)$$

Donde:

q_{4-5} = caudal del segmento “4 – 5”

$\bar{V}_4 = V_m$ = velocidad media para vertical 4 = 0.248 m^2/s

$\bar{V}_5 = V_m$ = velocidad media para vertical 5 = 0.148 m^2/s (tabla 106 del anexo)

b_4 = distancia de la vertical 4 a la vertical 0 de la sección (orilla) = 2.88 m

b_5 = distancia de la vertical 5 a la vertical 0 de la sección (orilla) = 3.60 m

$$q_{4-5} = \left(\frac{0.248 + 0.148}{2} \right) \cdot (3.60 - 2.88) = 0.1426 \text{ m}^3/s$$

En el caso de las verticales 0 y 10, para el cálculo de los caudales (q_0 , q_{10} , q_{0-1} y q_{9-10}) se consideraron las velocidades medidas lo más cerca posible a las márgenes, como si hubieran sido medidas sobre las verticales mismas. La recopilación de datos de tiempos y revoluciones para las tres secciones van de la tabla 24 – 221 del anexo con sus respectivas curvas de distribución de velocidades, figuras 32 – 91 del anexo. Luego de ello se plotearon los datos de velocidad obtenidos para las secciones (figuras 92 – 97) y se trazaron las isotacas (figuras 98 – 103), con el objetivo de ver el comportamiento del flujo en las secciones.

Los valores de velocidades medias y de " V_m/V_s " se encuentran tabulados en las tablas 222 – 227 para cada sección, y los caudales y sus dos correspondientes series de datos se calcularon en las tablas 228 – 233.

3.3 Aforo por flotadores

Se delimitaron dos tramos en el río, un tramo de longitud " $L = 20$ " metros que va de la sección AR1 a AA y un tramo de longitud " $L = 19$ " metros que va de la sección AR2 a AA. Como se indica en el punto 2.3.6 en el capítulo 2, ya que las secciones aguas arriba y la sección aguas abajo se encuentran divididas por el mismo número de verticales, se hicieron cuatro mediciones de tiempo de recorrido de un flotador de vertical a vertical para cada tramo, verticales 1 a 9, teniéndose entonces un valor de velocidad superficial " V_s " por cada vertical. Dicho valor de " V_s " se multiplicó por la relación " V_m/V_s " para obtener el valor de velocidad media. Para el caso de la vertical 4 se tienen las siguientes relaciones " V_m/V_s ", respecto al tramo AR2 – AA utilizando el método de velocidad media por medio del promedio de las velocidades en la vertical:

$$V_m/V_s = 1.249 \text{ (para sección AR2.1, tabla 235)}$$

$$V_m/V_s = 1.177 \text{ (para sección AR2.2, tabla 235)}$$

$$V_m/V_s = (1.249 + 1.177)/2 = 1.213 \text{ (" V_m/V_s " promedio de sección AR2, tabla 237)}$$

$$V_m/V_s = 1.254 \text{ (para sección AA.1, tabla 236)}$$

$$V_m/V_s = 1.250 \text{ (para sección AA.2, tabla 236)}$$

$$V_m/V_s = (1.254 + 1.250)/2 = 1.252 \text{ (" V_m/V_s " promedio de sección AA, tabla 237)}$$

Por lo que el valor de " V_m/V_s " para el tramo es:

$$V_m/V_s = (1.213 + 1.252)/2 = 1.233 \text{ (tabla 238)}$$

Tabla 16. Determinación de “Vs” para vertical 4, tramo AR2 - AA

t₁	30.37
t₂	33.94
t₃	29.75
t₄	29.32
t_{prom}	30.85
V_s	0.616

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

La tabla 16 muestra los valores de tiempo de recorrido en segundos medidos (t_1 , t_2 , t_3 y t_4), el valor promedio de tiempo (t_{prom}) y la velocidad superficial (V_s) en m/s calculada para la vertical 4 del tramo AR2 – AA, de longitud “L = 20 m”. Luego de su cálculo, la velocidad superficial se multiplicó por el factor “ V_m/V_s ” promedio del tramo para encontrar el valor de la velocidad media “ V_m ” correspondiente a la vertical a lo largo del mismo.

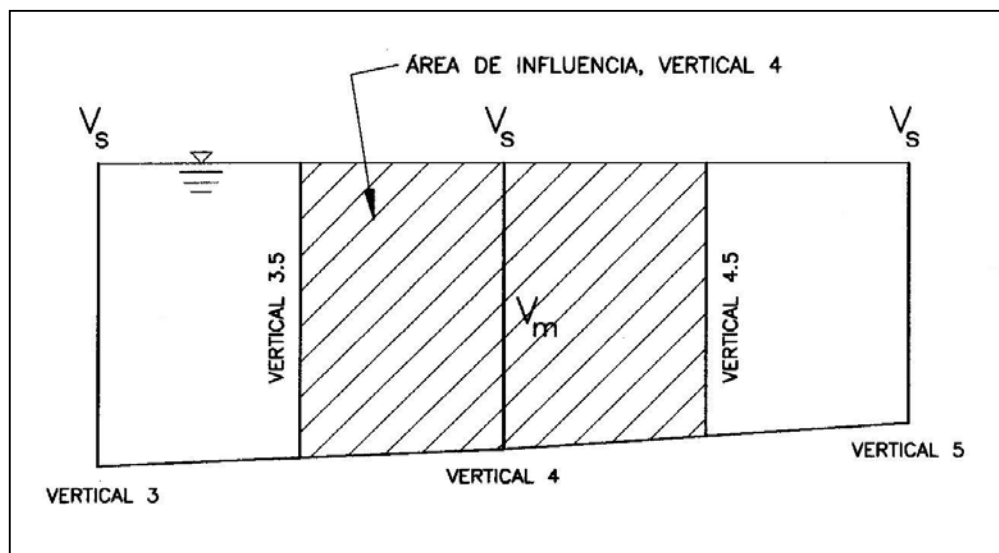
$$V_m = V_s \cdot (V_m/V_s) = (0.616) \cdot (1.233) = 0.759 \text{ m/s}$$

Según la guía No. 168 de la OMM puede también utilizarse un valor “F” de 0.86 (tabla 4, capítulo 2) en función de la profundidad de inmersión del flotador para determinar el valor de la velocidad media, en este caso se utilizó un valor de “F = 0.85” por tratarse de esferas de poliestireno expandido de 4.5 cm de diámetro:

$$V_m = V_s \cdot F = (0.616) \cdot (0.85) = 0.524 \text{ m/s}$$

Cada vertical tiene un área o zona media correspondiente de la sección AR2 a la sección AA (capítulo 2, inciso 2.3.6), esta zona media está en función del área de influencia de la vertical, en el caso de la vertical 4, el área está delimitada por la mitad del segmento 3 – 4 y la mitad del segmento 4 – 5 (figura 25).

Figura 25. Área de influencia para vertical 4.



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Basándose en la figura 25, el área de influencia para la vertical 4 es entonces:

$$A_{3.5-4.5} = 0.2979 \text{ m}^2 \text{ (para sección AR2, tabla 241)}$$

$$A_{3.5-4.5} = 0.2639 \text{ m}^2 \text{ (para sección AA, tabla 241)}$$

Teniéndose para la vertical 4 una zona media:

$$A_{\text{prom}} \text{ AR2 - AA} = (0.2979 + 0.2639)/2 = 0.2809 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el caudal para el segmento es:

$$q_{(3.5 - 4.5)} = (0.759) \cdot (0.2809) = 0.2133 \text{ m}^3/\text{s}$$

En el caso de la velocidad media con el factor "F":

$$q_{(3.5 - 4.5)} = (0.524) \cdot (0.2809) = 0.1471 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dada la tendencia del flotador de no seguir una ruta determinada, se calculó el promedio de todas las velocidades medias ($V_{m(\text{promedio})}$) y posteriormente este valor se multiplicó por el área promedio total de la sección (tabla 245).

$$A_{\text{total}} \text{ AR2} = 2.0808 \text{ m}^2 \text{ (tabla 241)}$$

$$A_{\text{total}} \text{ AA} = 2.5668 \text{ m}^2 \text{ (tabla 241)}$$

$$A_{\text{prom}} \text{ AR2} - \text{AA} = (2.0808 + 2.5668)/2 = 2.3238 \text{ m}^2$$

Teniéndose un valor $V_{m(\text{promedio})} = 0.765 \text{ m/s}$ (tabla 240), el valor del caudal total circulante es:

$Q_{\text{total}} = (0.765) \cdot (2.3238) = 1.7769 \text{ m}^3/\text{s}$ (se utilizaron el mayor número de decimales posibles). Para el caso de los aforos por medio de flotadores, las tablas 234, 235 y 236 contienen los valores de " V_m/V_s " para las secciones AR1, AR2 y AA; la tabla 237 es el valor de " V_m/V_s " promedio para cada sección (promedio entre AR1.1 y AR1.2, etc.). La tabla 238 es el resultado de los valores promedios de " V_m/V_s " para los tramos de 20 y 19 metros, al promediarse los valores de AR1 y AR2 con AA.

Seguidamente se determinan los valores de la velocidad superficial “ V_s ” en la tabla 239, para ambos tramos y en la tabla 240 se calcula la velocidad media “ V_m ” multiplicando los valores de velocidad superficial por los coeficientes de la tabla 238. La tabla 241 es la determinación de las áreas de influencia para cada vertical y las tablas 242 y 243 son el cálculo de caudal por segmento para cada tramo, cuya sumatoria es igual al caudal circulante. En las tablas 244 y 245 se calcula el caudal con el valor de “ V_m ” promedio.

3.4 Aforo por trazador

Se seleccionó un sitio aguas arriba que reuniera las condiciones para que se diera una mezcla adecuada de la solución inyectada, el sitio seleccionado presentaba presencia de rocas que formaban pequeñas cataratas que la favorecían (figura 28), además de contarse con la longitud de mezcla. La concentración de trazador, en este caso sal común, en la solución inyectada era mucho mayor que la que la corriente tenía presente. La ecuación utilizada para determinar la longitud de mezcla fue la siguiente.

$$L = b \cdot Q^{1/3}$$

Donde:

L = longitud de muestreo (en metros)

$Q \approx 1 \text{ m}^3/\text{s}$

$b = 50$ por tratarse de una inyección a una distancia aproximada a $\frac{1}{4}$ del ancho del cauce.

$$L = b \cdot Q^{1/3} = 50 \text{ m}$$

Debido a la mezcla generada por el choque del agua con las rocas, se midieron concentraciones a una distancia de 45 metros. Se llevaron a cabo cinco tomas de datos para inyección constante (tablas 246 a 250, figuras 104 a 108) y cinco con inyección puntual (tablas 251 a 255, figuras 109 a 113).

Para la medición de concentraciones se utilizó una sonda utilizada para determinar salinidad en lagunas y un cronómetro para verificar la variación de la concentración respecto al tiempo, para inyección constante y puntual.

La ecuación para la determinación del caudal para inyección constante fue:

$$Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

Donde:

q = caudal constante al que es inyectada la solución, también llamado " Q_{tr} " (caudal de trazador)

C_0 = concentración de natural de sal de la corriente

C_1 = concentración de sal de la solución inyectada

C_2 = concentración de sal medida en la corriente durante la inyección, se tomó como el promedio de concentraciones que se mantienen aproximadamente constantes en un período de tiempo, celdas resaltadas en las tablas 246 a 250)

Como ejemplo se tiene la inyección constante 3 (tabla 16):

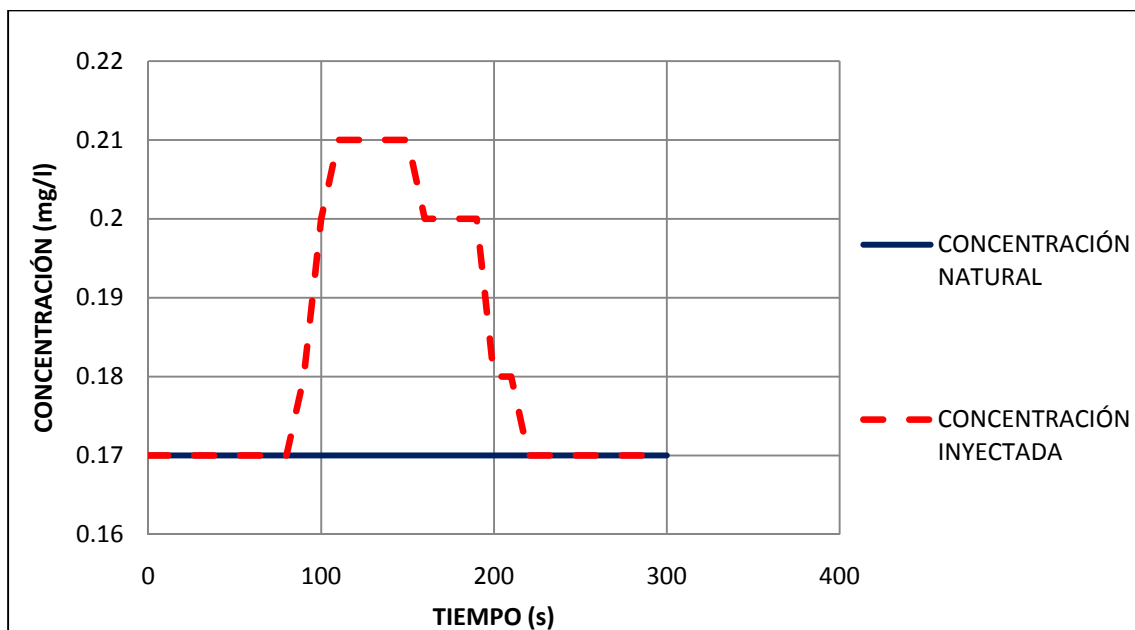
Tabla 17. Inyección constante 3.

$C_0 = 0.17 \text{ mg/l}$						
$C_1 = 139.70 \text{ mg/l}$						
$Q_{tr} = 0.000312 \text{ m}^3/\text{s}$				$L_{mezcla} = 50 \text{ m}$		
t	C_0	C_2		t	C_0	C_2
0	0.17	0.17		210	0.17	0.18
10	0.17	0.17		220	0.17	0.18
20	0.17	0.17		230	0.17	0.17
30	0.17	0.17		240	0.17	0.17
40	0.17	0.17		250	0.17	0.17
50	0.17	0.17		260	0.17	0.17
60	0.17	0.17		270	0.17	0.17
70	0.17	0.17		280	0.17	0.17
80	0.17	0.17		290	0.17	0.17
90	0.17	0.18		300	0.17	0.17
100	0.17	0.20		310	0.17	0.17
110	0.17	0.21		320	0.17	0.17
120	0.17	0.21				
130	0.17	0.21				
140	0.17	0.21				
150	0.17	0.21				
160	0.17	0.20				
170	0.17	0.20				
180	0.17	0.20				
190	0.17	0.20				
200	0.17	0.18				
$C_{2(\text{prom})} = 0.2050 \text{ mg/l}$						
$Q_{\text{total}} = 1.2435 \text{ m}^3/\text{s}$						

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

El valor de concentración natural es de 0.17 mg/l, el valor concentración de la solución inyectada es de 139.70 mg/l a un caudal “ $q = Q_{tr} = 0.00312 \text{ m}^3/\text{s}$ ”. Puede observarse que la concentración “ C_2 ” se mantiene estable de 100 a 190 segundos (tabla 16 y figura 26), el valor de la concentración de trazador (sal común) en la corriente aumenta y se mantiene prácticamente constante con valores de 0.20 – 0.21 mg/l y luego decrece, por lo que el valor promedio de concentración “ C_2 ” alcanzado es 0.2050 mg/l. El valor de caudal obtenido para este caso es de $1.2435 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 26. Inyección constante 3.



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Dado que la corriente tenía presente una concentración inicial del trazador, para la inyección puntual se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\int_0^T C dt - C_0 \cdot T}$$

Donde:

V = volumen de la solución inyectada

C_0 = concentración inicial o concentración natural de la corriente

C_1 = concentración de la solución inyectada

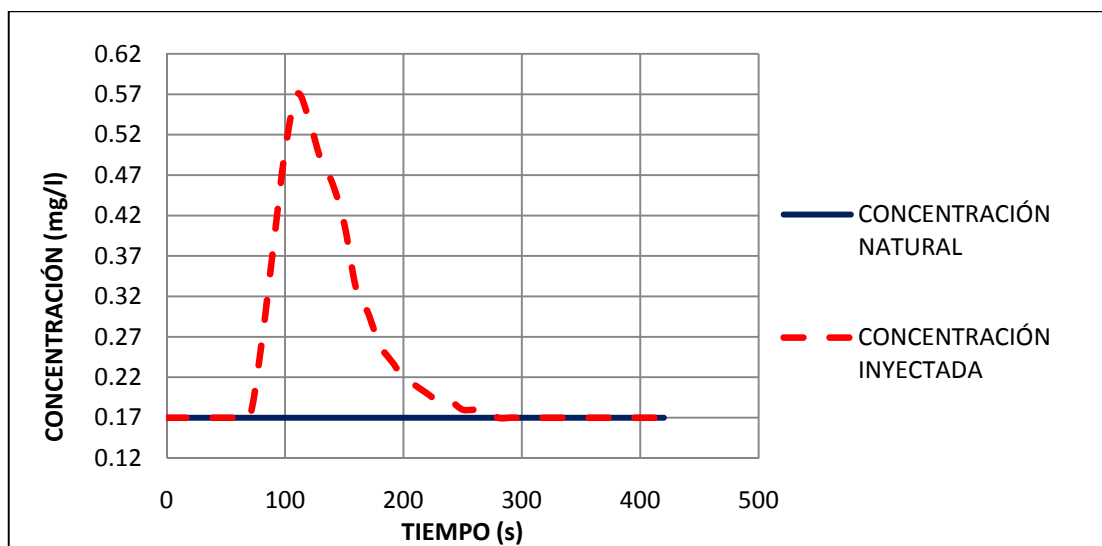
$\int_0^T C dt - C_0 \cdot T = C_3$ = concentración de trazador por unidad de tiempo = área entre la curva de la solución inyectada y la horizontal que representa la concentración natural.

T = tiempo total que tarda la solución en cruzar el punto de muestreo

C_3 se aproximó por medio de trapecios.

El valor de la concentración varía hasta alcanzar un valor máximo de 0.57 mg/l, cuando comienza a decrecer hasta alcanzar el valor original de 0.17 mg/l (tabla 17 y figura 27). El volumen inyectado fue de 0.244 m³ y el valor del área entre curvas, es decir “ C_3 ” obtenido es de 28.90 mg/l, por lo que el caudal circulante determinado es de 1.1215 m³/s.

Figura 27. Inyección puntual 5.



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 18. Inyección puntual 5.

$C_0 = 0.17 \text{ mg/l}$						
$C_1 = 133.00 \text{ mg/l}$						
$V = 0.244 \text{ m}^3$			$L_{\text{mezcla}} = 50 \text{ m}$			
t	C_0	C_2		t	C_0	C_2
0	0.17	0.17		220	0.17	0.20
10	0.17	0.17		230	0.17	0.19
20	0.17	0.17		240	0.17	0.19
30	0.17	0.17		250	0.17	0.18
40	0.17	0.17		260	0.17	0.18
50	0.17	0.17		270	0.17	0.18
60	0.17	0.17		280	0.17	0.17
70	0.17	0.17		290	0.17	0.17
80	0.17	0.26		300	0.17	0.17
90	0.17	0.38		310	0.17	0.17
100	0.17	0.50		320	0.17	0.17
110	0.17	0.57		330	0.17	0.17
120	0.17	0.54		340	0.17	0.17
130	0.17	0.49		350	0.17	0.17
140	0.17	0.46		360	0.17	0.17
150	0.17	0.41		370	0.17	0.17
160	0.17	0.33		380	0.17	0.17
170	0.17	0.30		390	0.17	0.17
180	0.17	0.26		400	0.17	0.17
190	0.17	0.24		410	0.17	0.17
200	0.17	0.22		420	0.17	0.17
210	0.17	0.21				
$C_3 = 28.90 \text{ mg/l/s}$						
$Q_{\text{total}} = 1.1215 \text{ m}^3/\text{s}$						

Fuente: elaboración propia.

3.5 Resultados obtenidos

Tabla 19. Caudales obtenidos con molinete.

Sección	Caudal (m ³ /s)
AR1.1	1.1533
AR1.2	1.1604
AR2.1	1.0321
AR2.2	1.0264
AA.1	1.0864
AA.2	1.0784
Q_{prom(molinete)}	1.0895 m³/s

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 20. Caudales obtenidos por aforo con flotadores.

	Q _{total}
Tramo AR1 – AA	1.9166
Tramo AR2 – AA	1.7644
Q_{prom(flottadores)}	1.8405 m³/s

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 21. Caudales obtenidos por aforo con flotadores, V_{m(prom)}.

	Q _{total}
Tramo AR1 – AA	1.8756
Tramo AR2 – AA	1.7557
Q_{prom(flottadores)}	1.8157 m³/s

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 22. Caudales obtenidos por inyección constante.

	Q_{total}
Inyección 1	1.6714
Inyección 2	1.0397
Inyección 3	1.2435
Inyección 4	1.8788
Inyección 5	1.4599
$Q_{prom(iny. cont)}$	1.4586 m³/s

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 23. Caudales obtenidos por inyección puntual.

	Q_{total}
Inyección 1	1.1276
Inyección 2	0.7973
Inyección 3	3.4684
Inyección 4	3.6916
Inyección 5	1.1215
$Q_{prom(iny. punt.)}$	2.0413 m³/s

Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Como puede verse, los valores de caudal determinados en el método del molinete permanecen muy cercanos, no así en el caso del uso de flotadores, donde a pesar que el valor de caudal obtenido no se alejó mucho del obtenido con molinete, dicho valor se consiguió al aplicar un factor “ $F = 0.85$ ” en función de la inmersión del flotador. Esto se debe a que una de las principales fuentes de error de los flotadores es que no sigan una ruta establecida, y en el caso del cauce aforado, se tenía una presencia abundante de obstáculos y rocas que daban lugar a resaltos y remolinos los cuales provocaban que el mismo de moviera de forma errática, debido a ello se determinó una velocidad superficial promedio para luego calcular una velocidad media de la sección.

A pesar de ello, el aforo con flotador puede dar una idea del caudal circulante en una corriente. Para el caso de la inyección de trazador, tanto para la inyección constante como para la inyección puntual, puede notarse que ambos métodos son eficientes para determinar el caudal, con la posible falla que una mala mezcla de la solución puede dar como resultado valores de caudal demasiado altos en algunos casos, 1.8788 m³/s para inyección constante y 3.6916 m³/s para inyección puntual.

CONCLUSIONES

1. En el caso del uso del molinete, la normativa más importante es la referente a su calibración, ya que de ella depende la veracidad de las velocidades medidas a lo largo de una vertical.
2. En algunas de las curvas de velocidades es posible notar el efecto de gradiente de presión que provoca el efecto de separación, por lo que puede deducirse que existen muchas pérdidas a lo largo del tramo aforado.
3. Debido a las pérdidas de energía por la existencia de obstáculos antes de la sección delimitada para el aforo con molinete, los valores de las relaciones " V_m/V_s " se ven afectados.
4. La irregularidad de las secciones fue uno de los factores más críticos, a pesar de ello, los caudales obtenidos con el uso del trazador, son muy cercanos en algunas inyecciones a los caudales obtenidos aplicando las diferentes metodologías para determinación de caudal con molinete.
5. A pesar de las deficiencias del uso del molinete en el tramo aforado, es uno de los métodos más útiles ya que es posible conocer el comportamiento de las curvas de igual velocidad, cosa que no puede hacerse en el caso de utilizar trazadores.

6. A pesar de dar resultados confiables, el método de aforo por trazadores tiene la deficiencia de no poder ser utilizado en secciones muy cargadas de sedimento, ya que estos pueden tener concentraciones de sal dentro de valores que puedan alterar las lecturas, o la concentración de sal inyectada puede no ser detectada o tener una variación mínima.
7. Para los aforos por trazador llevados a cabo durante las pruebas realizadas, puede notarse que se tiene un mejor control en el caso de la inyección constante que en la inyección puntual, ya que en dos ocasiones los valores de caudal quedaron muy por encima de los determinados por medio de otros métodos.
8. En el caso de la corriente aforada, se obtuvieron valores del coeficiente " $K = V_m/V_s$ " mayores a uno en la mayoría de los casos, debido a la rugosidad del cauce y las irregularidades en su forma.
9. Dado que el aforo por inyección puntual dio resultados muy variados en este caso, puede ser utilizado como un aforo preliminar.
10. Debido a la presencia de rocas, las isotacas no presentan el comportamiento típico para un canal uniforme, en el caso del cauce aforado.

RECOMENDACIONES

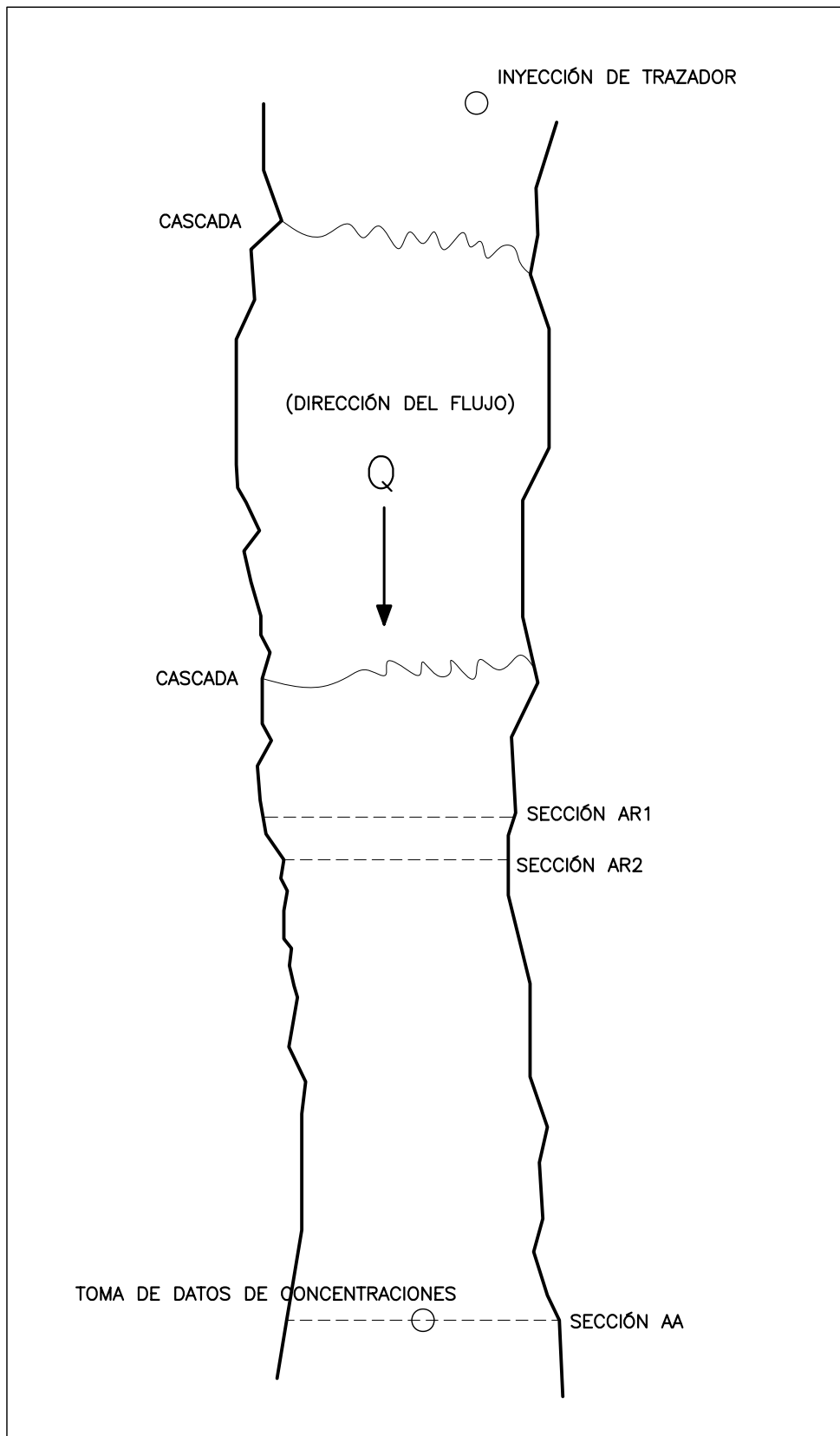
1. Para mejores mediciones, en el caso del molinete es recomendado el uso de un molinete tipo “pigmeo”, debido a que por su tamaño puede llegar más cerca del fondo que un molinete de copas.
2. En el caso de la utilización de molinete, debe verificarse con el fabricante el tipo de mantenimiento necesario y la norma relacionada con la calibración del mismo para tener una buena fiabilidad del instrumento.
3. En caso de poder utilizarse únicamente el aforo por trazadores, ya sea inyección continua o puntual, debe repetirse el procedimiento cierto número de veces para observar una tendencia hacia un valor de caudal.
4. Los valores de “ V_m/V_s ” obtenidos durante las pruebas son aplicables únicamente para el cauce aforado, por lo que no deben ser tomados como norma general.
5. Debe utilizarse una sola normativa para un aforo y no tomarse diferentes conceptos para llevarlos a cabo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chow, Ven Te. **Hidráulica de canales abiertos**. (Colombia; Editorial McGraw Hill, 1994) pp. 23 – 30, pp. 189 – 202.
2. Streeter, Victor L. y otros. **Mecánica de fluidos**. (Novena edición, Colombia; Editorial McGraw Hill, 2000) pp. 276 – 282, pp. 328.
3. OMM. **Guía de prácticas hidrológicas, OMM – No. 168**. (Quinta edición, 1994) pp. 147 – 173.
4. Herschy, Reginald. **Streamflow measurement**. (Tercera edición, 2009) pp. 6 – 11, pp. 12 – 68, pp. 197 – 203, pp. 269 – 274, pp. 391 – 420.
5. Corporación autónoma regional del valle del Cauca. **Manual de procedimientos hidrométricos**. (Volumen XII, Universidad del Valle, Santiago de Cali; Colombia, 2002) pp. 2.5 – 2.13.

ANEXOS

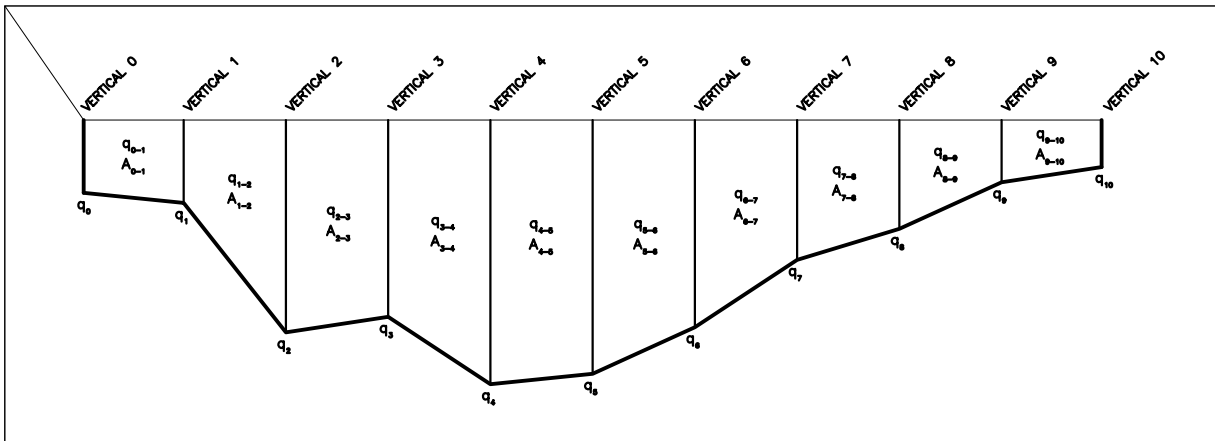
Figura 28. Esquema de sitio para la realización de aforos



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

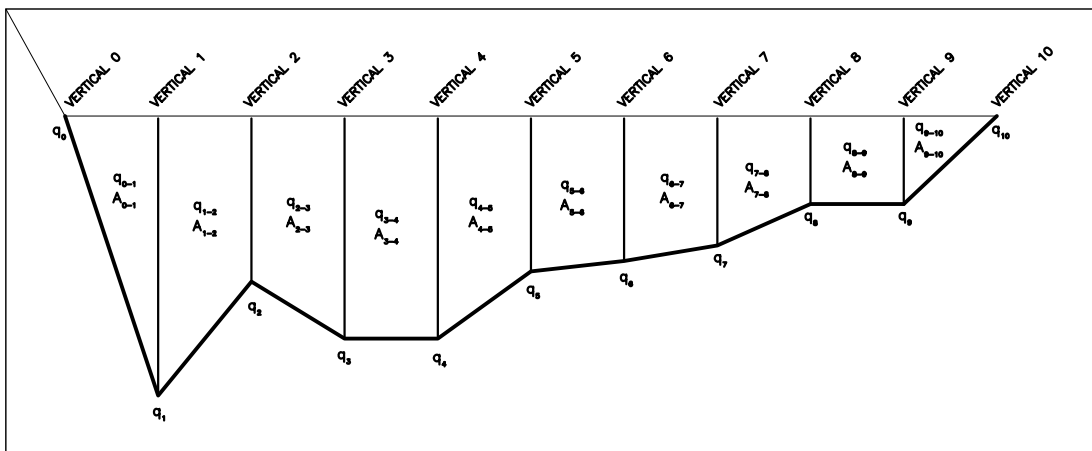
ANEXOS

Figura 29. Sección AR1



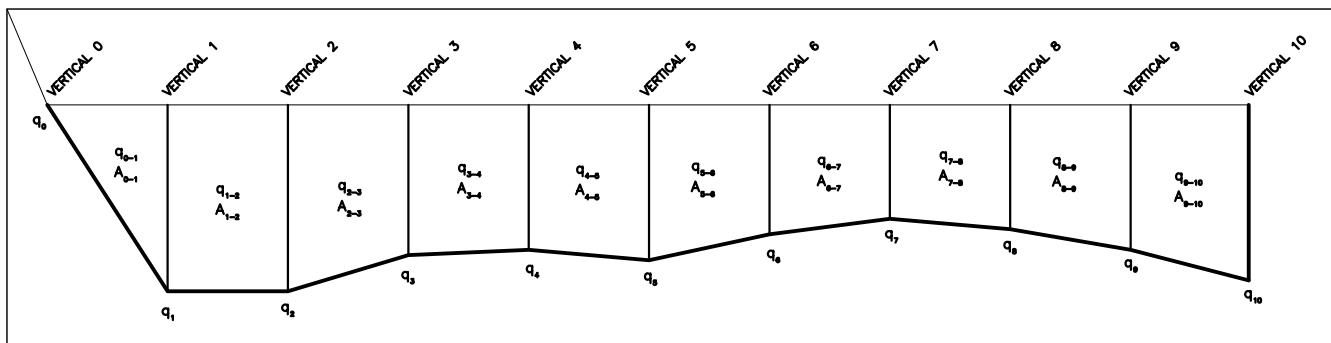
Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 30. Sección AR2



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 31. Sección AA



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 51. Datos vertical 9, sección AR1.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	26.40	27.86	27.04	27.10	10	0.369	0.256	0.120
0.2-H	0.024	21.32	22.12	21.60	21.68	10	0.461	0.319	0.096
0.4-H	0.048	23.36	23.72	25.44	24.17	10	0.414	0.287	0.072
0.6-H	0.072	28.88	25.46	26.22	26.85	10	0.372	0.258	0.048
0.8-H	0.079	24.98	29.52	27.78	27.43	10	0.365	0.253	0.041
Lecho	0.085	30.34	28.18	29.50	29.34	10	0.341	0.237	0.035

Fuente: elaboración propia

Tabla 52. Velocidades medias, vertical 9, sección AR1.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.268	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.258	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.286	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.272	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.273	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.273	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.028	m ² /s

Fuente: elaboración propia

Tabla 53. Relación V_m/V_s, vertical 9, sección AR1.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.048
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.009
V _{m 2 ptos.}	1.118
V _{m 3 ptos.}	1.063
V _{m 5 ptos.}	1.067
V _{m 6 ptos.}	1.065

Fuente: elaboración propia.

Tabla 54. Datos vertical 10, sección AR1.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	28.35	27.60	27.72	27.89	5	0.179	0.126	0.090
0.2-H	0.018	19.74	20.28	20.46	20.16	5	0.248	0.173	0.072
0.4-H	0.036	20.16	18.78	18.57	19.17	5	0.261	0.182	0.054
0.6-H	0.050	19.44	19.26	20.85	19.85	5	0.252	0.176	0.040
0.8-H	0.053	22.62	21.60	23.79	22.67	5	0.221	0.154	0.037
Lecho	0.055	27.60	27.72	27.69	27.67	5	0.181	0.127	0.035

Fuente: elaboración propia

Tabla 55. Velocidades medias, vertical 10, sección AR1.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.156	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.176	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.164	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.170	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.161	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.162	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.011	m ² /s

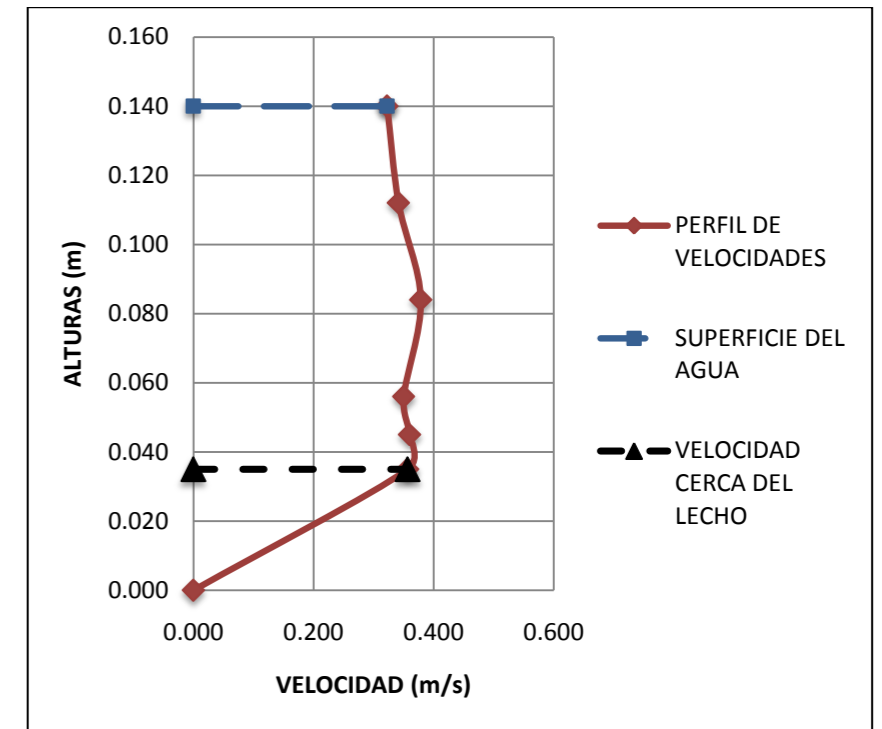
Fuente: elaboración propia

Tabla 56. Relación V_m/V_s, vertical 10, sección AR1.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.241
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.395
V _{m 2 ptos.}	1.300
V _{m 3 ptos.}	1.347
V _{m 5 ptos.}	1.277
V _{m 6 ptos.}	1.288

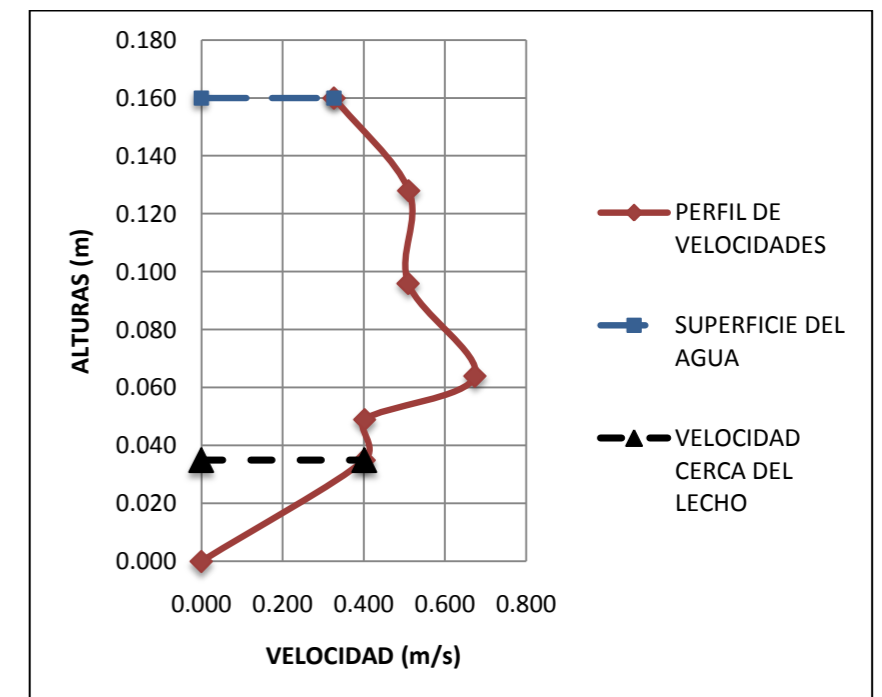
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Perfil de velocidades, vertical 0, sección AR1.1



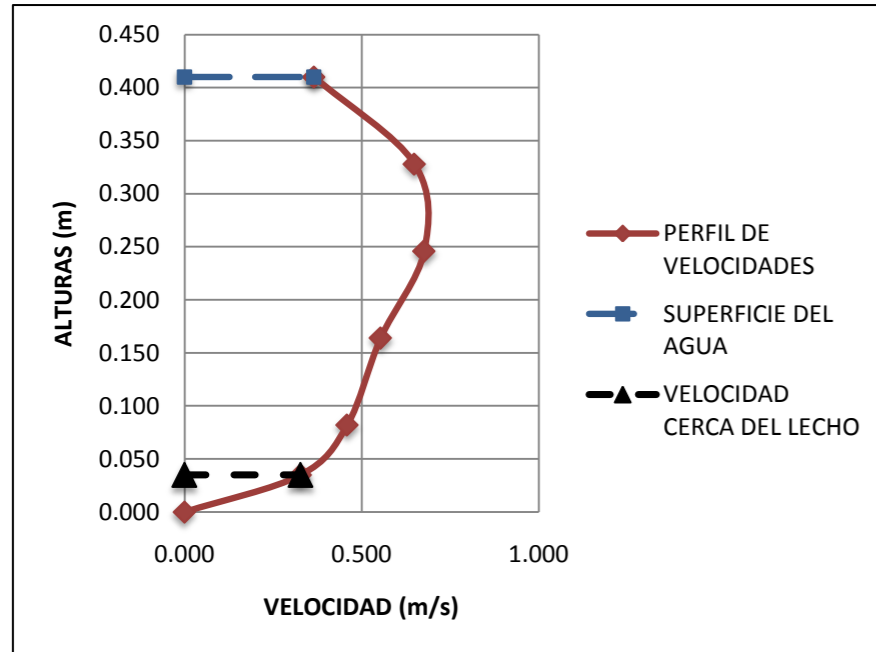
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Perfil de velocidades, vertical 1, sección AR1.1



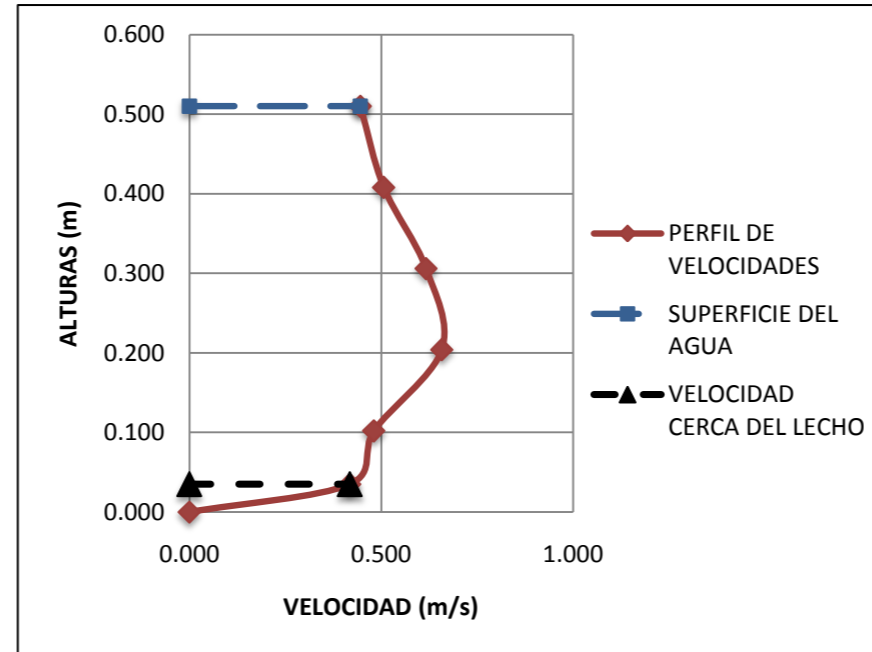
Fuente: elaboración propia

Figura 34. Perfil de velocidades, vertical 2, sección AR1.1



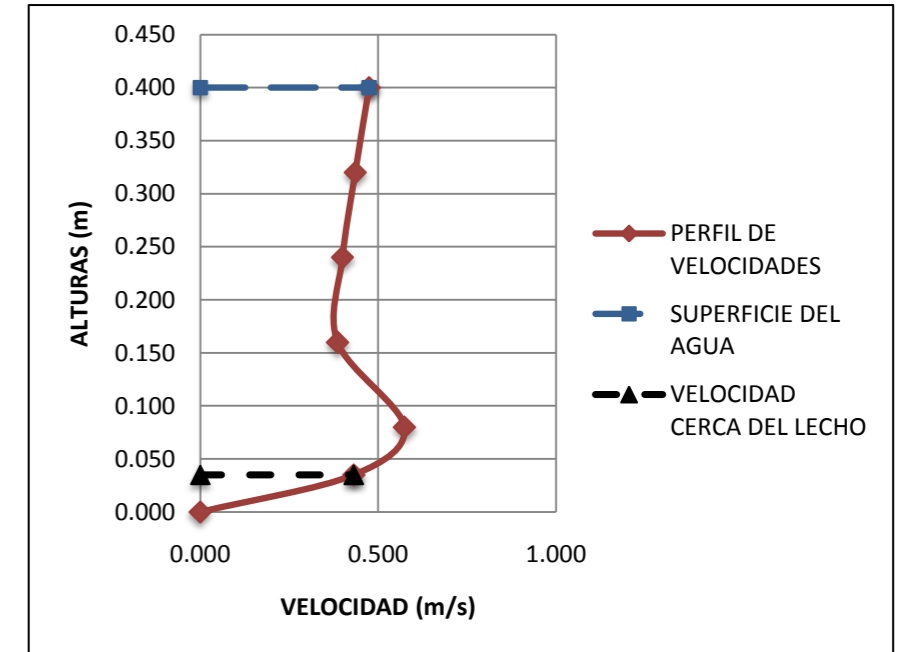
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AR1.1



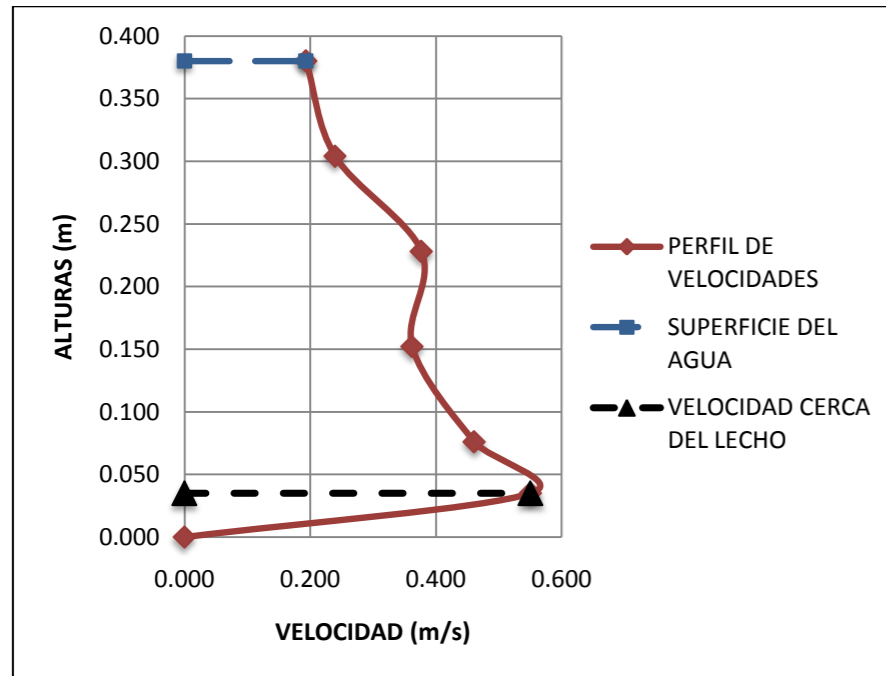
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Perfil de velocidades, vertical 6, sección AR1.1



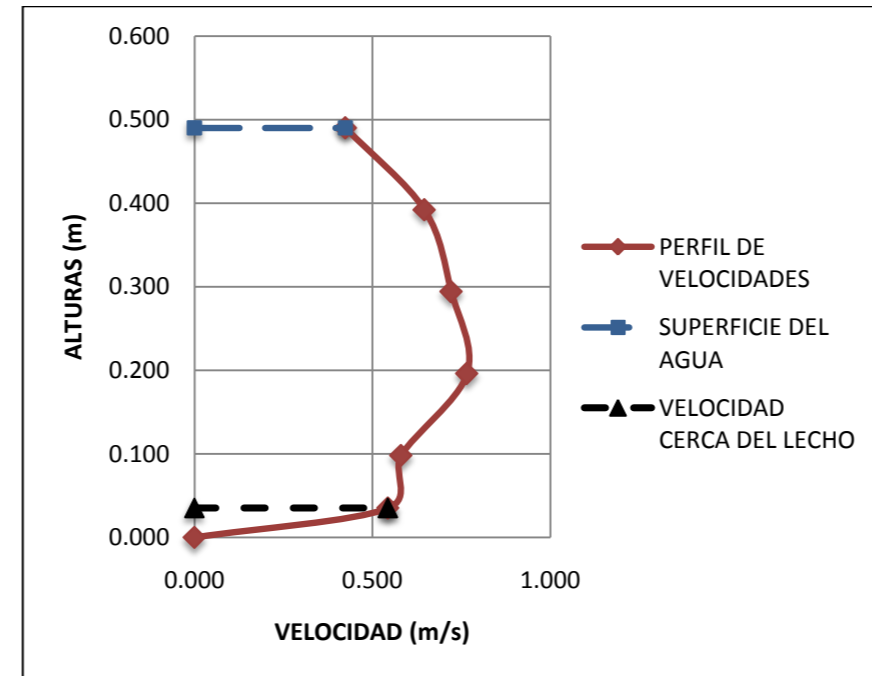
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Perfil de velocidades, vertical 3, sección AR1.1



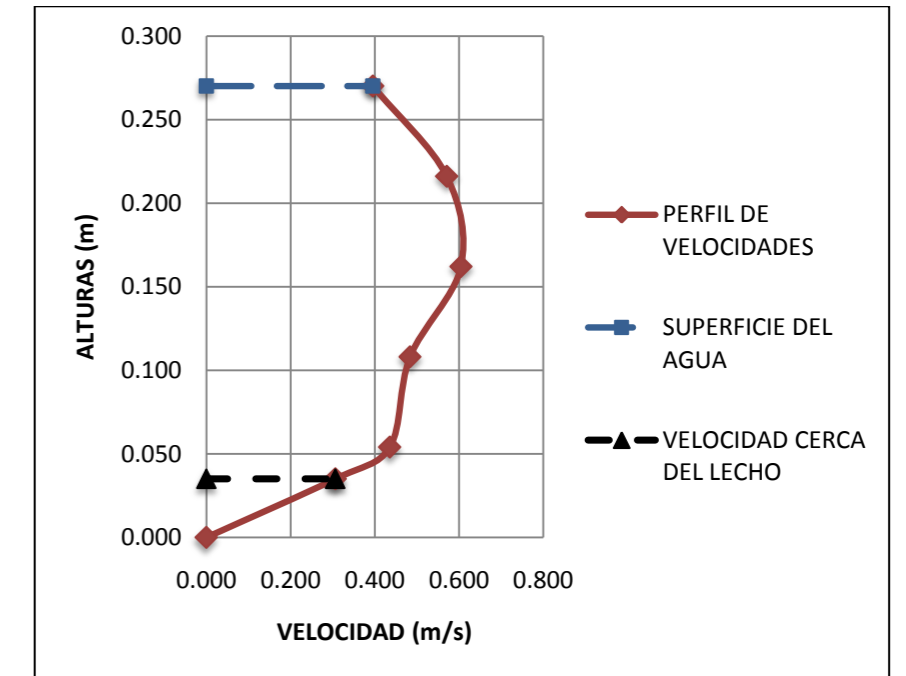
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Perfil de velocidades, vertical 5, sección AR1.1



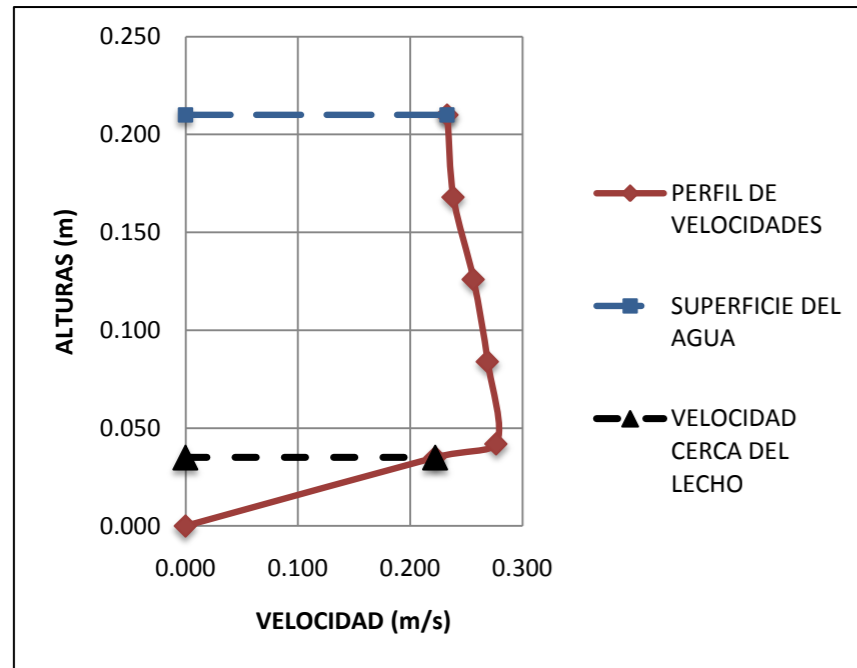
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Perfil de velocidades, vertical 7, sección AR1.1



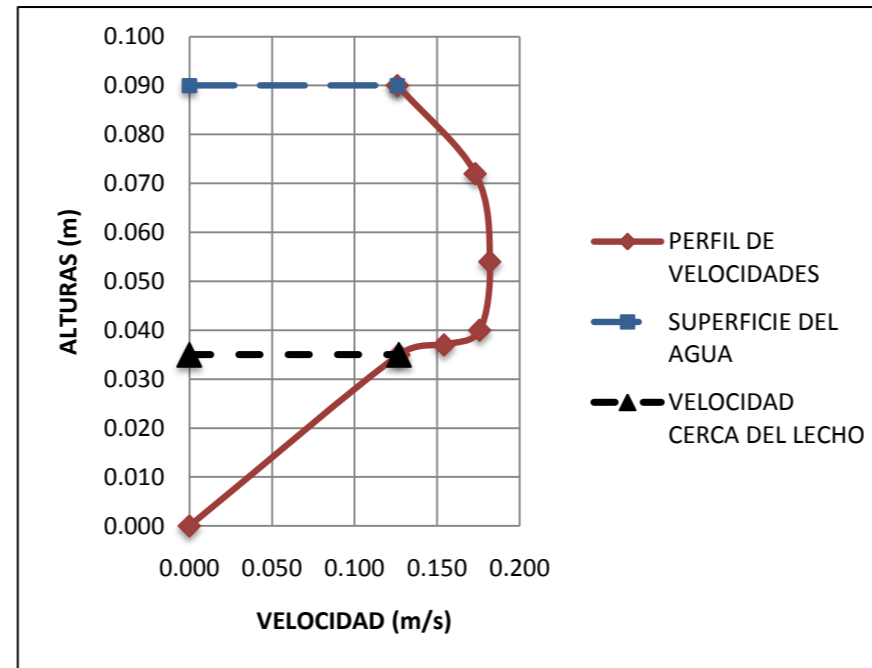
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Perfil de velocidades, vertical 8, sección AR1.1



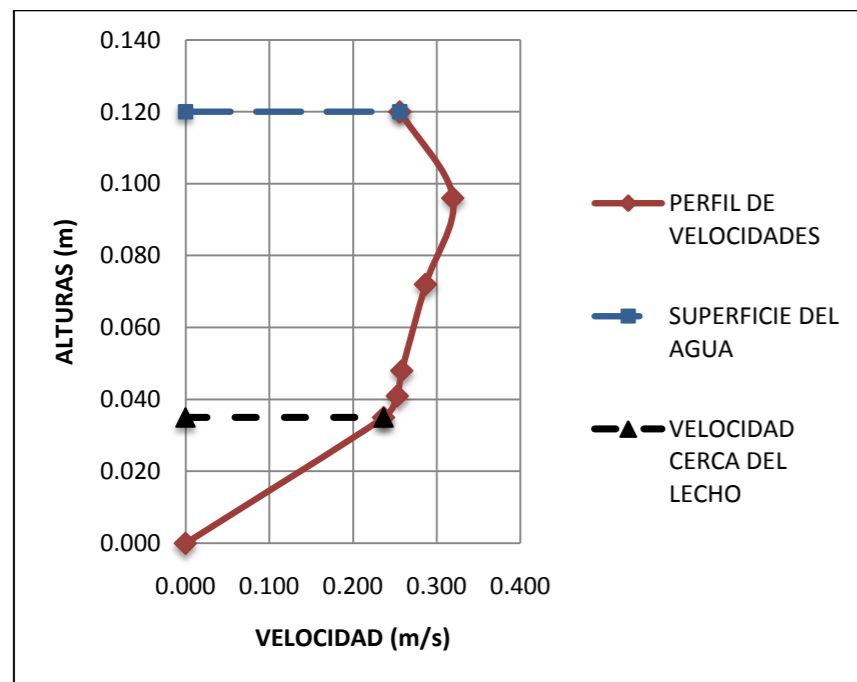
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Perfil de velocidades, vertical 10, sección AR1.1



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Perfil de velocidades, vertical 9, sección AR1.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 57. Datos vertical 0, sección AR1.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	21.02	22.42	21.42	21.62	10	0.463	0.320	0.140
0.2-H	0.028	20.70	22.22	20.68	21.20	10	0.472	0.327	0.112
0.4-H	0.056	18.25	19.77	20.70	19.57	10	0.511	0.353	0.084
0.6-H	0.084	16.83	18.15	18.89	17.96	10	0.557	0.385	0.056
0.8-H	0.095	18.13	18.09	19.10	18.44	10	0.509	0.375	0.045
Lecho	0.105	20.71	19.18	19.00	19.63	10	0.542	0.352	0.035

Fuente: elaboración propia

Tabla 58. Velocidades medias, vertical 0, sección AR1.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.352	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.385	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.351	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.368	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.356	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.355	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.043	m ² /s

Fuente: elaboración propia

Tabla 59. Relación V_m/V_s, vertical 0, sección AR1.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.099
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.202
V _{m 2 ptos.}	1.095
V _{m 3 ptos.}	1.149
V _{m 5 ptos.}	1.111
V _{m 6 ptos.}	1.109

Fuente: elaboración propia.

Tabla 87. Datos vertical 10, sección AR1.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	31.74	23.01	28.20	27.65	5	0.181	0.127	0.090
0.2-H	0.018	19.98	18.57	18.90	19.15	5	0.261	0.182	0.072
0.4-H	0.036	19.92	20.10	18.75	19.59	5	0.255	0.178	0.054
0.6-H	0.050	20.10	18.39	19.02	19.17	5	0.261	0.182	0.040
0.8-H	0.053	26.94	31.86	18.72	25.84	5	0.193	0.136	0.037
Lecho	0.055	29.61	29.91	30.21	29.91	5	0.167	0.118	0.035

Fuente: elaboración propia

Tabla 88. Velocidades medias, vertical 10, sección AR1.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.154	m/s
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.182	m/s
V _m 2 ptos.	0.159	m/s
V _m 3 ptos.	0.170	m/s
V _m 5 ptos.	0.161	m/s
V _m 6 ptos. (distribución de velocidades)	0.160	m/s
V _m (método gráfico)	0.011	m ² /s

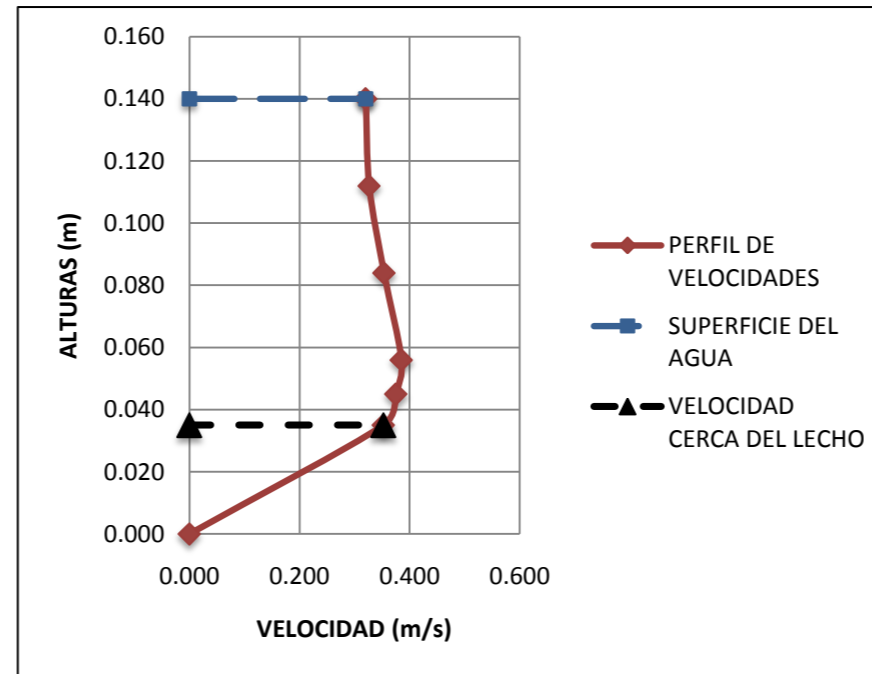
Fuente: elaboración propia

Tabla 89. Relación V_m/V_s, vertical 10, sección AR1.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.210
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	1.432
V _m 2 ptos.	1.251
V _m 3 ptos.	1.341
V _m 5 ptos.	1.266
V _m 6 ptos. (distribución de velocidades)	1.260

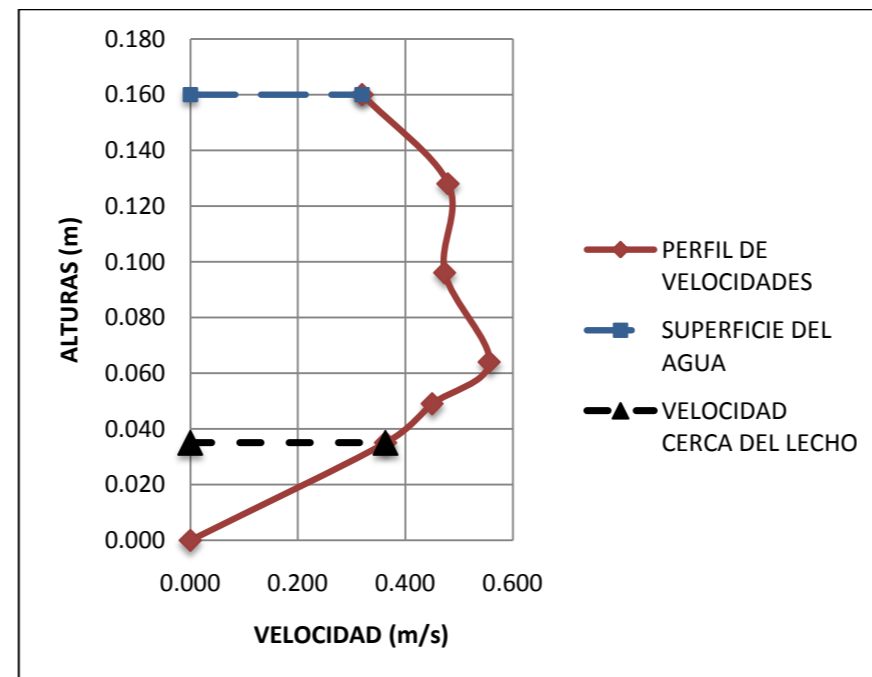
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Perfil de velocidades, vertical 0, sección AR1.2



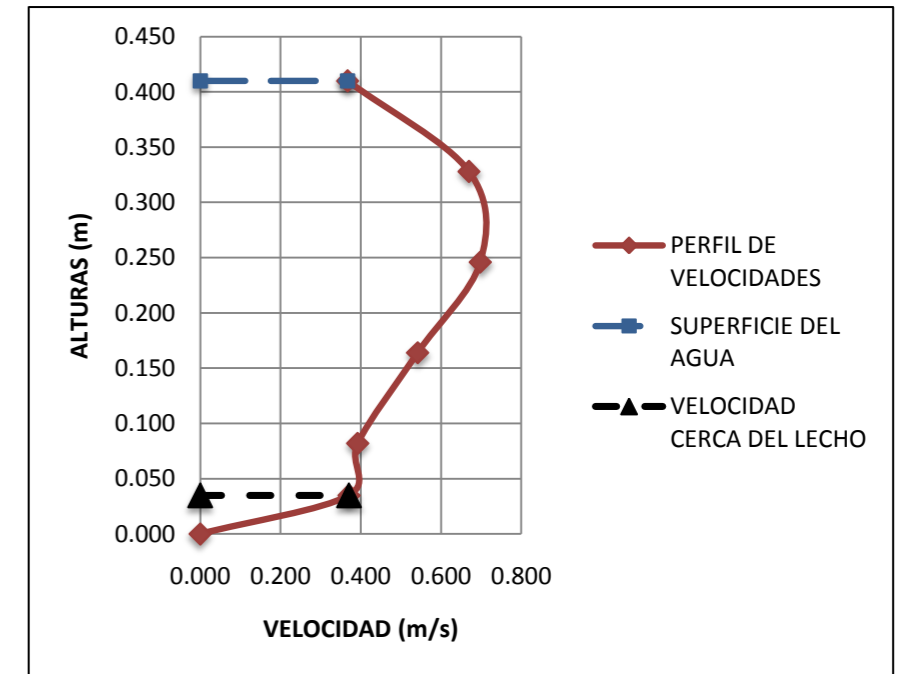
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Perfil de velocidades, vertical 1, sección AR1.2



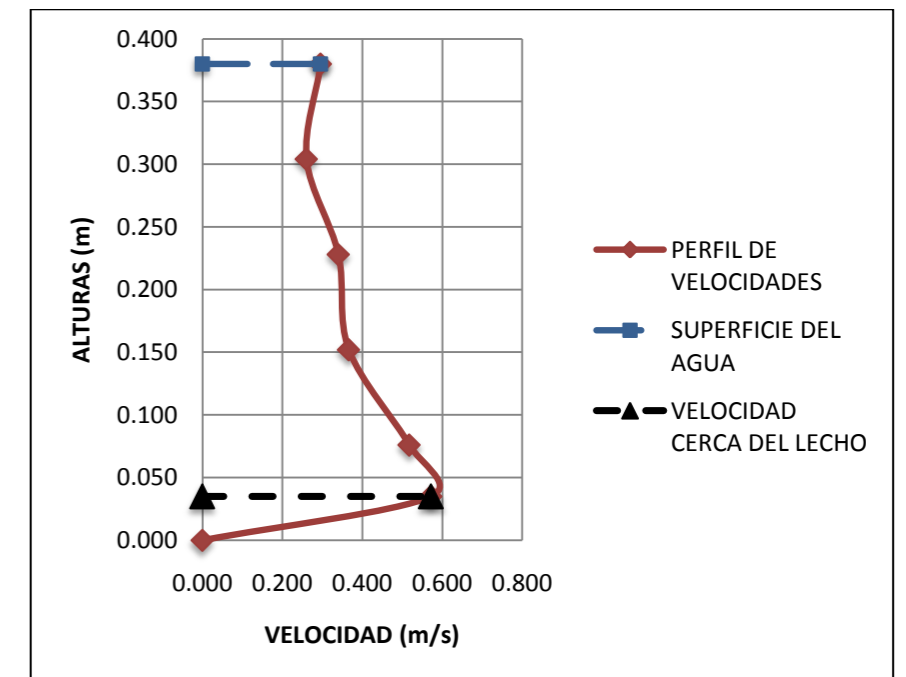
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Perfil de velocidades, vertical 2, sección AR1.2



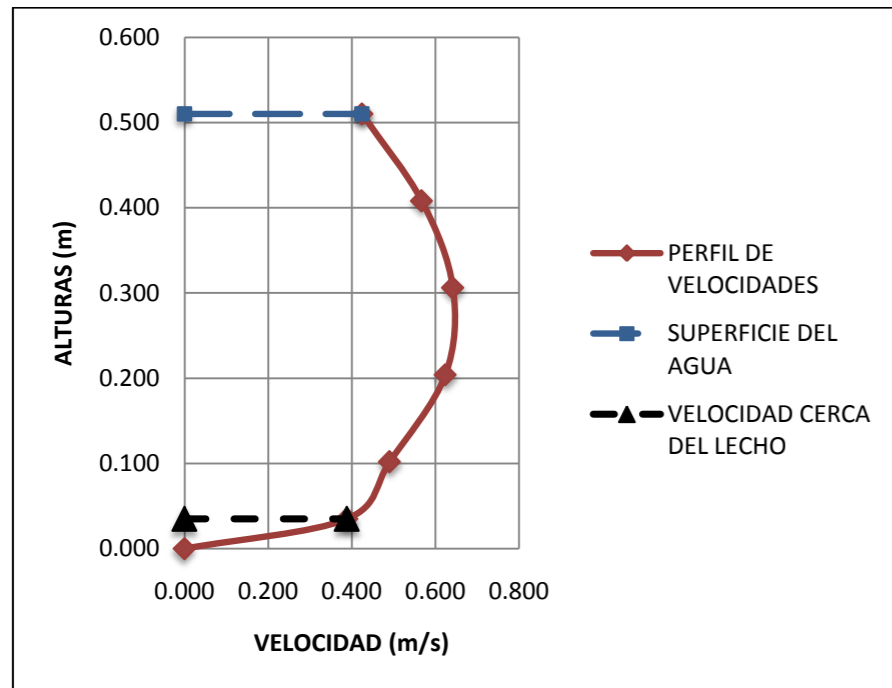
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Perfil de velocidades, vertical 3, sección AR1.2



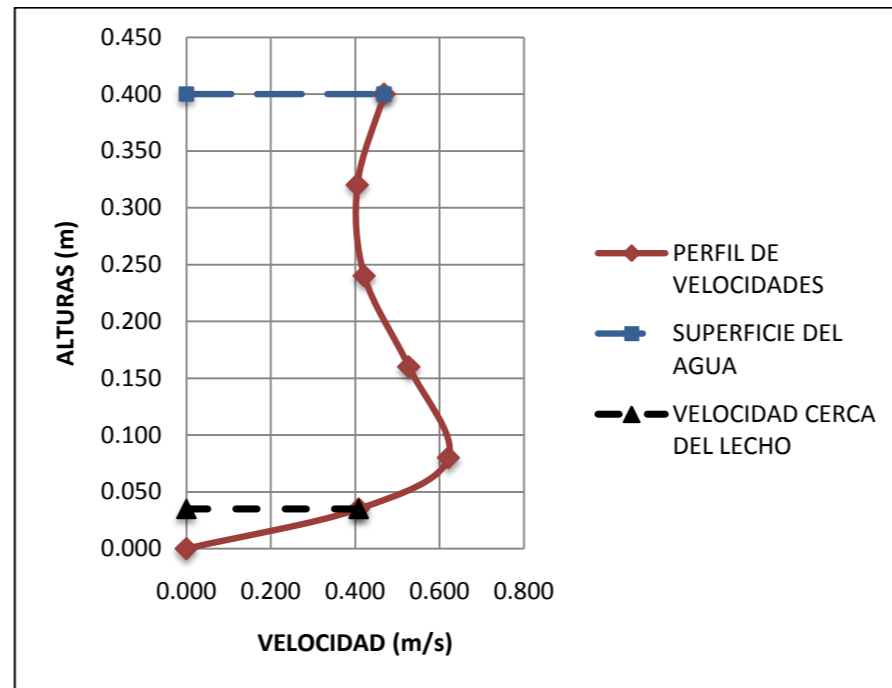
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AR1.2



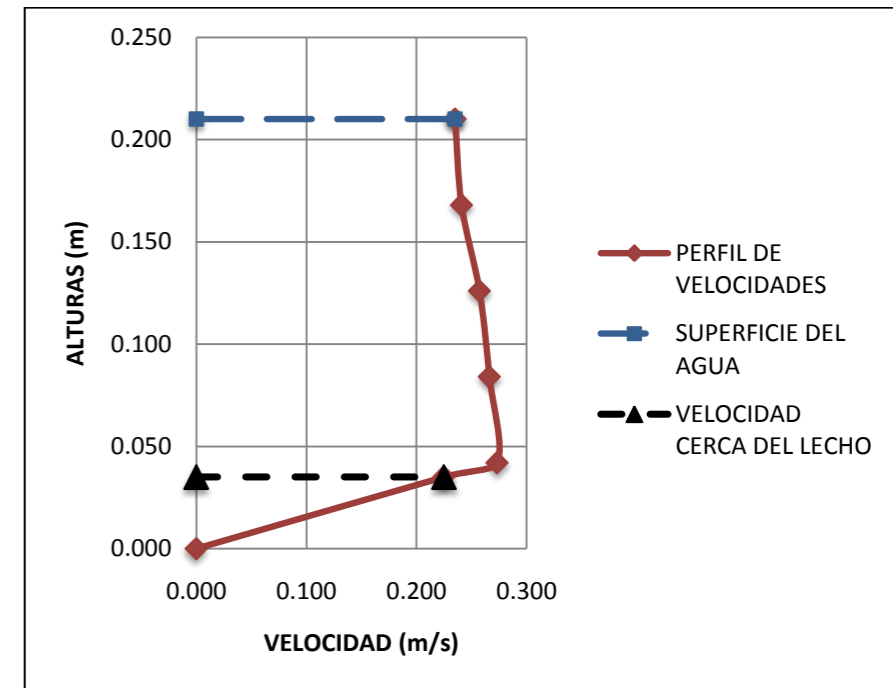
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Perfil de velocidades, vertical 6, sección AR1.2



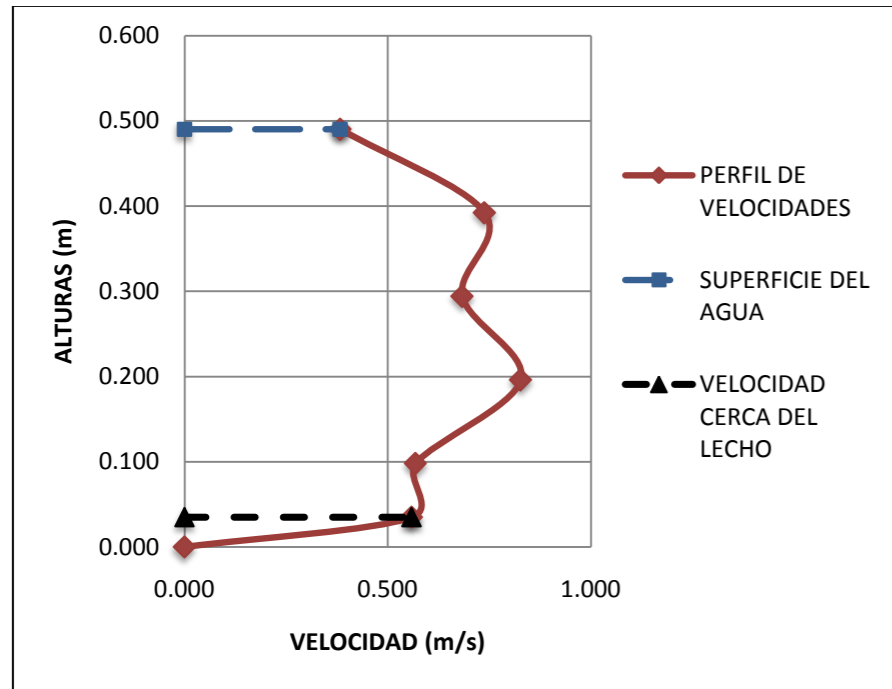
Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Perfil de velocidades, vertical 8, sección AR1.2



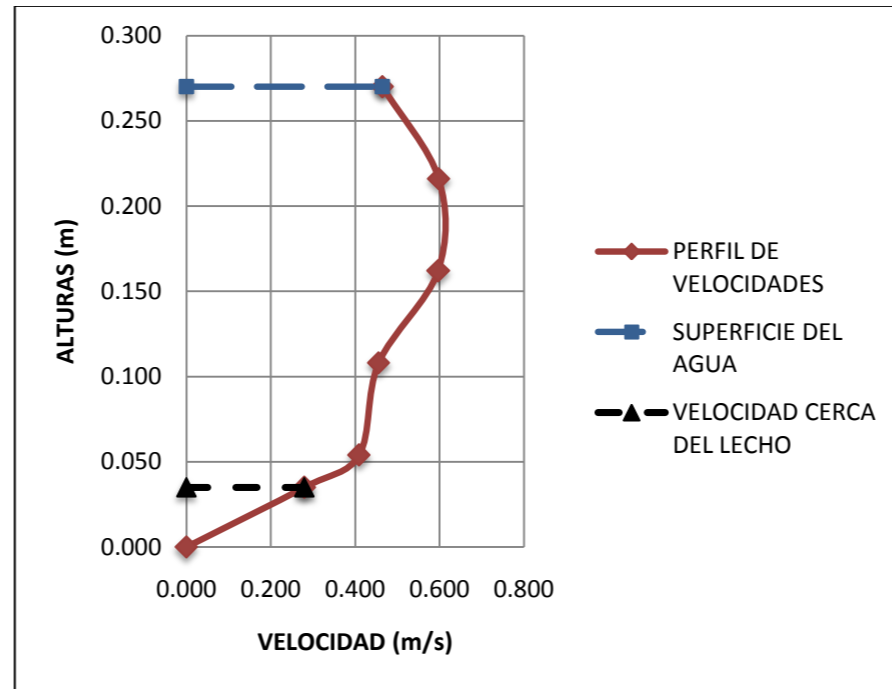
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Perfil de velocidades, vertical 5, sección AR1.2



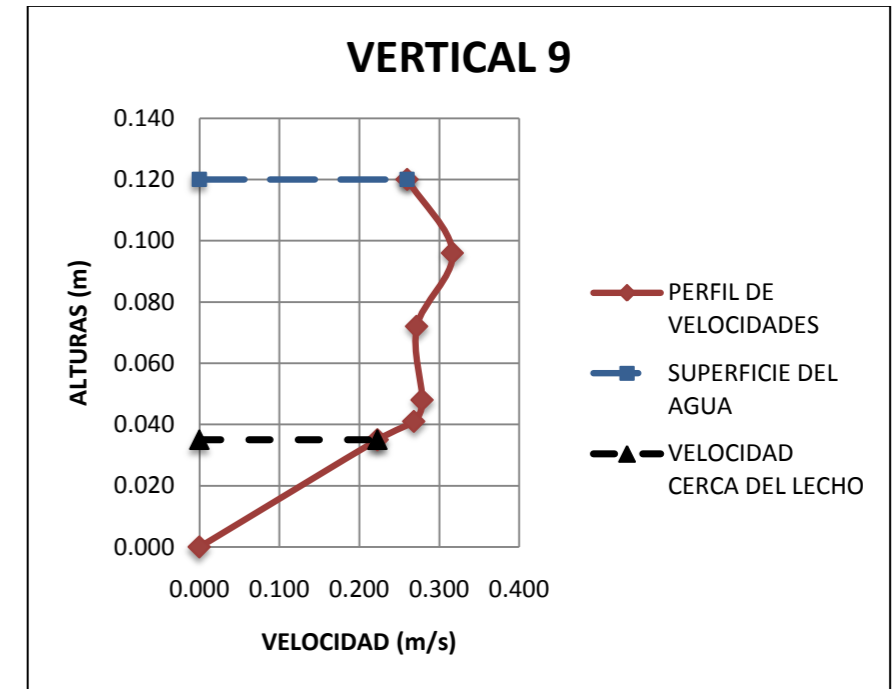
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Perfil de velocidades, vertical 7, sección AR1.2



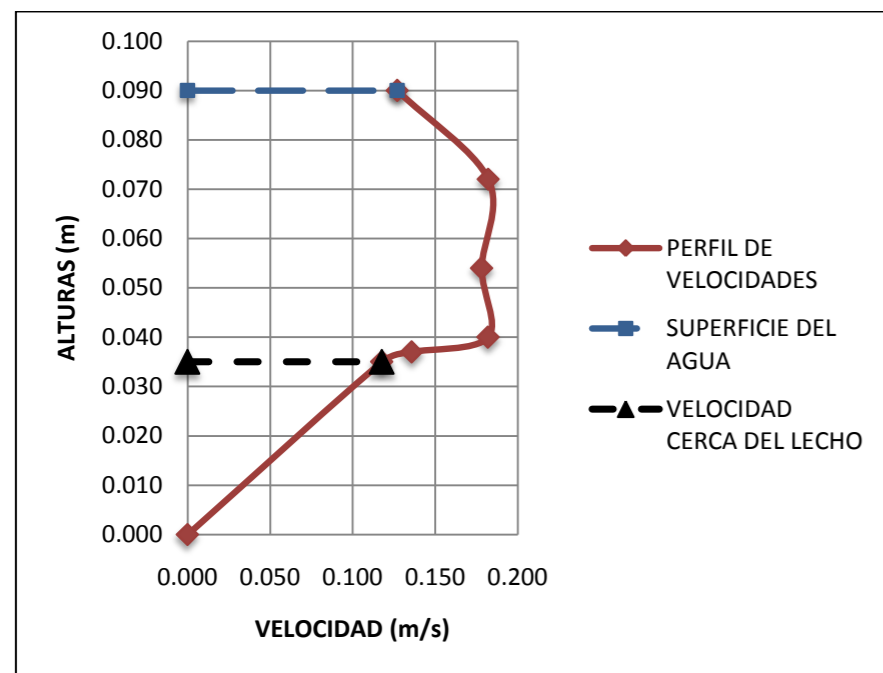
Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Perfil de velocidades, vertical 9, sección AR1.2



Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Perfil de velocidades, vertical 10, sección AR1.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 90. Datos vertical 0, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.00	30.11	31.53	29.85	30.50	15	0.492	0.340	0.00
0.2-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.4-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.6-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.8-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Lecho	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 93. Datos vertical 1, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	23.96	24.58	23.83	24.12	15	0.622	0.430	0.540
0.2-H	0.108	13.86	13.85	13.70	13.80	15	1.087	0.748	0.432
0.4-H	0.216	10.13	9.97	10.27	10.12	15	1.482	1.019	0.324
0.6-H	0.324	16.97	17.28	17.09	17.11	15	0.877	0.604	0.216
0.8-H	0.432	21.38	21.31	21.16	21.28	15	0.705	0.486	0.108
Lecho	0.505	23.50	23.81	23.66	23.66	15	0.634	0.438	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 91. Velocidades medias, vertical 0, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	----	m/s
V _m 1 pto. (V _{0,6H})	----	m/s
V _m 2 ptos.	----	m/s
V _m 3 ptos.	----	m/s
V _m 5 ptos.	----	m/s
V _m 6 ptos.	----	m/s
V _m (método gráfico)	----	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 94. Velocidades medias, vertical 1, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.621	m/s
V _m 1 pto. (V _{0,6H})	0.604	m/s
V _m 2 ptos.	0.617	m/s
V _m 3 ptos.	0.611	m/s
V _m 5 ptos.	0.590	m/s
V _m 6 ptos.	0.658	m/s
V _m (método gráfico)	0.347	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 92. Relación V_m/V_s, vertical 0, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	----
V _m 1 pto. (V _{0,6H})	----
V _m 2 ptos.	----
V _m 3 ptos.	----
V _m 5 ptos.	----
V _m 6 ptos.	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 95. Relación V_m/V_s, vertical 1, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.446
V _m 1 pto. (V _{0,6H})	1.407
V _m 2 ptos.	1.437
V _m 3 ptos.	1.422
V _m 5 ptos.	1.373
V _m 6 ptos.	1.533

Fuente: elaboración propia.

Tabla 96. Datos vertical 2, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	19.32	19.28	19.30	19.30	10	0.518	0.358	0.320
0.2-H	0.064	14.76	14.78	14.83	14.79	10	0.676	0.467	0.256
0.4-H	0.128	18.77	18.78	18.80	18.78	15	0.799	0.551	0.192
0.6-H	0.192	12.14	12.03	11.95	12.04	10	0.831	0.573	0.128
0.8-H	0.256	28.91	29.13	29.09	29.04	10	0.344	0.239	0.064
Lecho	0.285	18.92	18.94	18.90	18.92	5	0.264	0.184	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 99. Datos vertical 3, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	23.70	23.66	23.60	23.65	10	0.42	0.293	0.430
0.2-H	0.086	14.41	14.44	14.32	14.39	10	0.69	0.480	0.344
0.4-H	0.172	19.26	19.25	19.22	19.24	15	0.78	0.538	0.258
0.6-H	0.258	11.37	11.57	11.66	11.53	10	0.87	0.598	0.172
0.8-H	0.344	16.39	16.34	16.34	16.36	10	0.61	0.422	0.086
Lecho	0.395	17.62	17.59	17.48	17.56	10	0.57	0.394	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 102. Datos vertical 4, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	22.48	22.53	22.60	22.54	15	0.666	0.460	0.430
0.2-H	0.086	15.08	15.07	15.00	15.05	15	0.997	0.687	0.344
0.4-H	0.172	15.24	15.28	15.09	15.20	15	0.987	0.680	0.258
0.6-H	0.258	16.85	17.04	17.02	16.97	15	0.884	0.609	0.172
0.8-H	0.344	12.00	11.85	11.99	11.95	10	0.837	0.577	0.086
Lecho	0.395	16.00	16.00	15.90	15.97	10	0.626	0.433	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 97. Velocidades medias, vertical 2, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.395	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.573	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.353	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.463	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.414	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.420	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.130	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 100. Velocidades medias, vertical 3, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.454	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.598	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.451	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.524	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.476	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.476	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.197	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 103. Velocidades medias, vertical 4, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.574	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.609	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.632	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.621	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.593	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.600	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.248	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 98. Relación V_m/V_s, vertical 2, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.103
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.598
V _{m 2 ptos.}	0.985
V _{m 3 ptos.}	1.291
V _{m 5 ptos.}	1.155
V _{m 6 ptos.}	1.172

Fuente: elaboración propia.

Tabla 101. Relación V_m/V_s, vertical 3, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.550
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	2.040
V _{m 2 ptos.}	1.539
V _{m 3 ptos.}	1.790
V _{m 5 ptos.}	1.626
V _{m 6 ptos.}	1.625

Fuente: elaboración propia.

Tabla 104. Relación V_m/V_s, vertical 4, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.249
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.326
V _{m 2 ptos.}	1.375
V _{m 3 ptos.}	1.350
V _{m 5 ptos.}	1.291
V _{m 6 ptos.}	1.305

Fuente: elaboración propia.

Tabla 105. Datos vertical 5, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	22.26	22.34	22.25	22.28	15	0.673	0.465	0.300
0.2-H	0.060	16.00	15.93	15.96	15.96	15	0.940	0.648	0.240
0.4-H	0.120	16.80	16.78	16.76	16.78	15	0.894	0.616	0.180
0.6-H	0.180	19.92	19.82	19.90	19.88	10	0.503	0.348	0.120
0.8-H	0.240	12.76	12.62	12.67	12.68	10	0.788	0.544	0.060
Lecho	0.265	14.00	14.22	14.26	14.16	10	0.706	0.487	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 108. Datos vertical 6, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	34.42	32.41	32.30	33.04	15	0.454	0.314	0.280
0.2-H	0.056	18.29	18.50	18.73	18.51	15	0.811	0.559	0.224
0.4-H	0.112	16.88	17.00	17.15	17.01	15	0.882	0.608	0.168
0.6-H	0.168	28.06	28.03	28.13	28.07	10	0.356	0.247	0.112
0.8-H	0.224	27.08	27.00	27.11	27.06	10	0.370	0.256	0.056
Lecho	0.245	38.23	38.38	38.30	38.30	10	0.261	0.182	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 111. Datos vertical 7, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	23.72	24.07	23.95	23.91	15	0.627	0.433	0.250
0.2-H	0.050	17.23	17.28	17.22	17.24	15	0.870	0.600	0.200
0.4-H	0.100	16.64	16.75	16.88	16.76	15	0.895	0.617	0.150
0.6-H	0.150	28.12	28.19	28.26	28.19	10	0.355	0.246	0.100
0.8-H	0.200	29.60	29.56	29.64	29.60	10	0.338	0.235	0.050
Lecho	0.215	24.52	24.37	24.57	24.49	10	0.408	0.283	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 106. Velocidades medias, vertical 5, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.518	m/s
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.348	m/s
V _m 2 ptos.	0.596	m/s
V _m 3 ptos.	0.472	m/s
V _m 5 ptos.	0.503	m/s
V _m 6 ptos.	0.526	m/s
V _m (método gráfico)	0.148	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 109. Velocidades medias, vertical 6, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.361	m/s
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.247	m/s
V _m 2 ptos.	0.408	m/s
V _m 3 ptos.	0.328	m/s
V _m 5 ptos.	0.343	m/s
V _m 6 ptos.	0.384	m/s
V _m (método gráfico)	0.103	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 112. Velocidades medias, vertical 7, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.402	m/s
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.246	m/s
V _m 2 ptos.	0.417	m/s
V _m 3 ptos.	0.332	m/s
V _m 5 ptos.	0.372	m/s
V _m 6 ptos.	0.411	m/s
V _m (método gráfico)	0.099	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 107. Relación V_m/V_s, vertical 5, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.115
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.749
V _m 2 ptos.	1.282
V _m 3 ptos.	1.015
V _m 5 ptos.	1.082
V _m 6 ptos.	1.133

Fuente: elaboración propia.

Tabla 110. Relación V_m/V_s, vertical 6, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.149
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.787
V _m 2 ptos.	1.297
V _m 3 ptos.	1.042
V _m 5 ptos.	1.090
V _m 6 ptos.	1.221

Fuente: elaboración propia.

Tabla 113. Relación V_m/V_s, vertical 7, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	0.929
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	0.569
V _m 2 ptos.	0.963
V _m 3 ptos.	0.766
V _m 5 ptos.	0.860
V _m 6 ptos.	0.949

Fuente: elaboración propia.

Tabla 114. Datos vertical 8, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	23.20	23.00	23.05	23.08	15	0.650	0.449	0.170
0.2-H	0.034	17.19	17.94	17.87	17.67	15	0.849	0.585	0.136
0.4-H	0.068	15.37	15.40	15.45	15.41	15	0.974	0.671	0.102
0.6-H	0.102	15.32	15.31	15.26	15.30	15	0.981	0.676	0.068
0.8-H	0.119	15.78	15.37	15.87	15.67	15	0.957	0.660	0.051
Lecho	0.135	18.67	18.50	18.48	18.55	15	0.809	0.558	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 117. Datos vertical 9, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	21.15	21.09	21.36	21.20	10	0.472	0.327	0.170
0.2-H	0.034	22.75	22.78	22.74	22.76	15	0.659	0.455	0.136
0.4-H	0.068	20.30	20.19	19.88	20.12	15	0.745	0.514	0.102
0.6-H	0.102	21.31	21.41	21.62	21.45	15	0.699	0.483	0.068
0.8-H	0.119	18.19	18.09	18.07	18.12	10	0.552	0.382	0.051
Lecho	0.135	18.76	18.65	18.55	18.65	10	0.536	0.371	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 120. Datos vertical 10, sección AR2.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.00	49.32	49.15	49.17	49.21	10	0.203	0.142	0.00
0.2-H	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0.4-H	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0.6-H	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0.8-H	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Lecho	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 115. Velocidades medias, vertical 8, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.600	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.676	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.622	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.649	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.611	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.619	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.093	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 118. Velocidades medias, vertical 9, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.422	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.483	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.418	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.451	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.427	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.437	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.067	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 121. Velocidades medias, vertical 10, sección AR2.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	----	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	----	m/s
V _{m 2 ptos.}	----	m/s
V _{m 3 ptos.}	----	m/s
V _{m 5 ptos.}	----	m/s
V _{m 6 ptos.}	----	m/s
V _{m (método gráfico)}	----	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 116. Relación V_m/V_s, vertical 8, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.336
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.506
V _{m 2 ptos.}	1.387
V _{m 3 ptos.}	1.446
V _{m 5 ptos.}	1.361
V _{m 6 ptos.}	1.379

Fuente: elaboración propia.

Tabla 119. Relación V_m/V_s, vertical 9, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.292
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.478
V _{m 2 ptos.}	1.281
V _{m 3 ptos.}	1.380
V _{m 5 ptos.}	1.309
V _{m 6 ptos.}	1.337

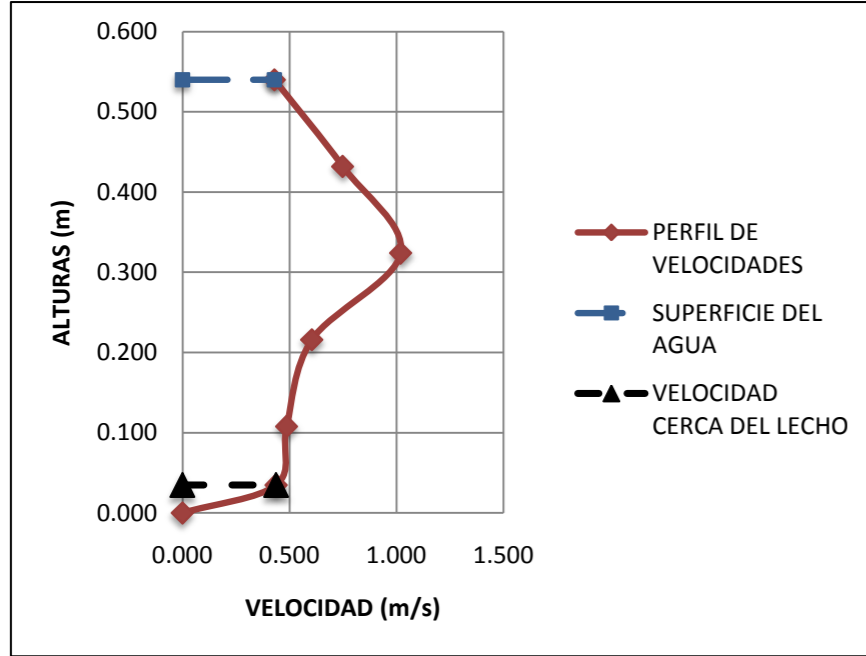
Fuente: elaboración propia.

Tabla 122. Relación V_m/V_s, vertical 10, sección AR2.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	----
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	----
V _{m 2 ptos.}	----
V _{m 3 ptos.}	----
V _{m 5 ptos.}	----
V _{m 6 ptos.}	----

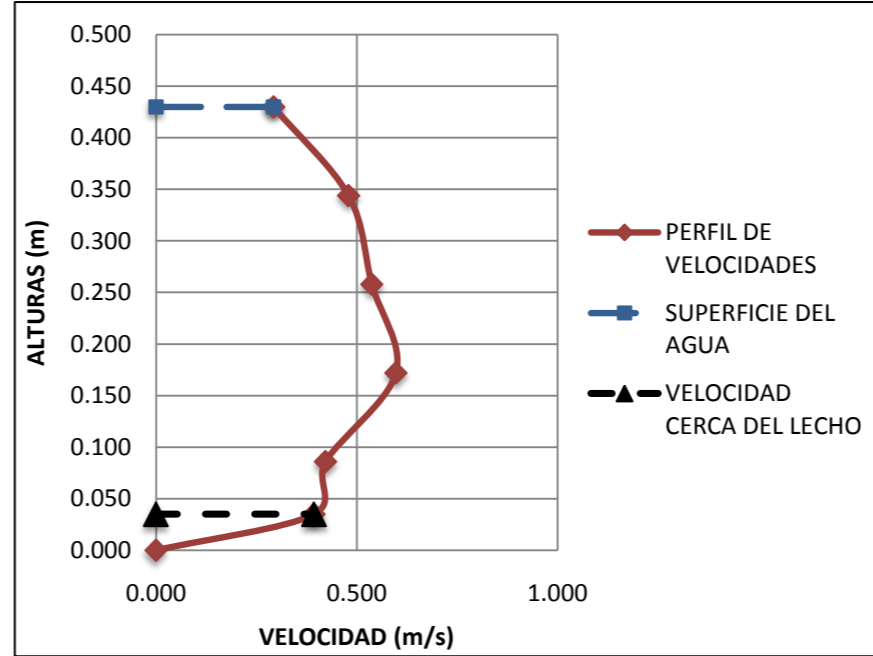
Fuente: elaboración propia.

Figura 54. Perfil de velocidades, vertical 1, sección AR2.1



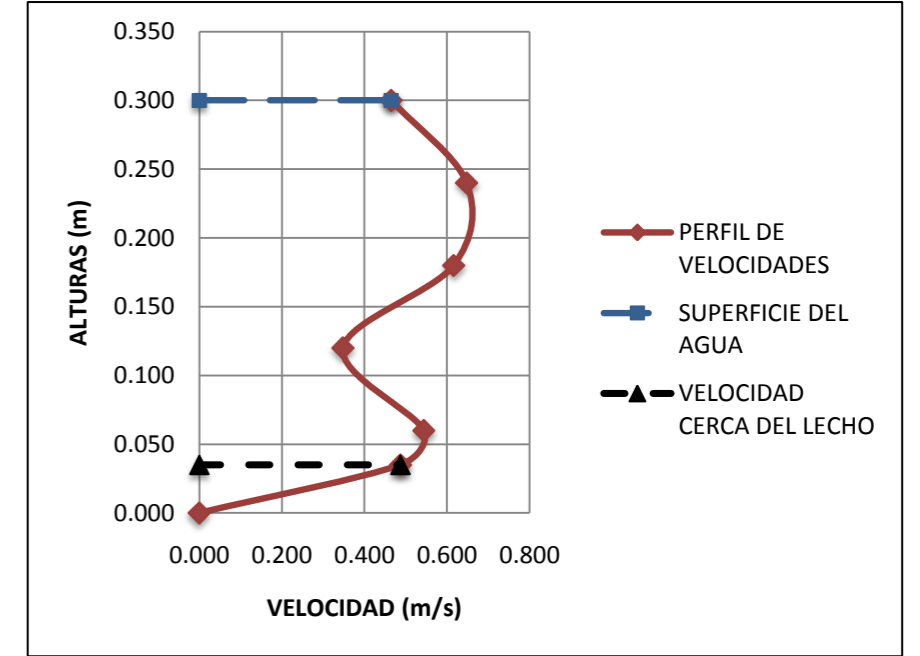
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Perfil de velocidades, vertical 3, sección AR2.1



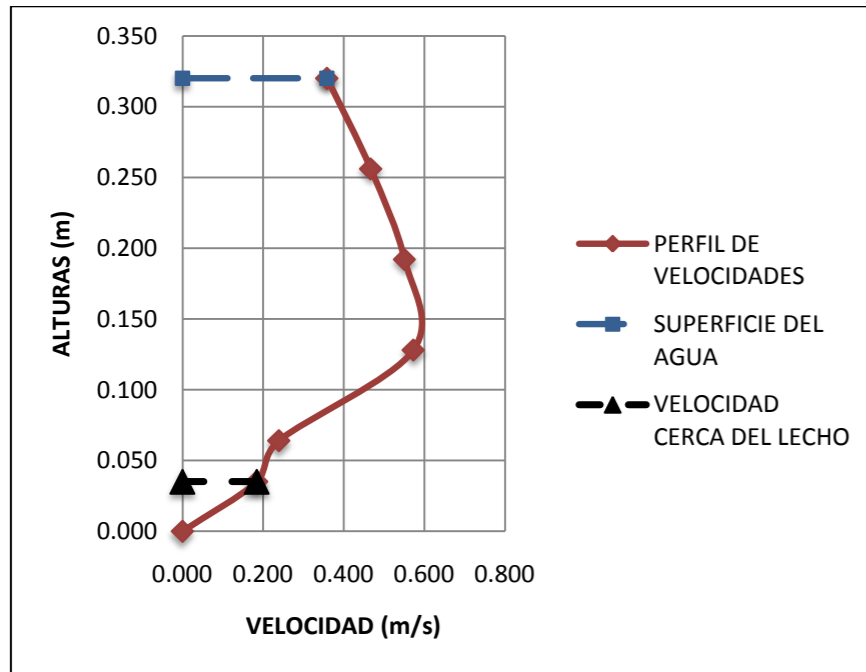
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. Perfil de velocidades, vertical 5, sección AR2.1



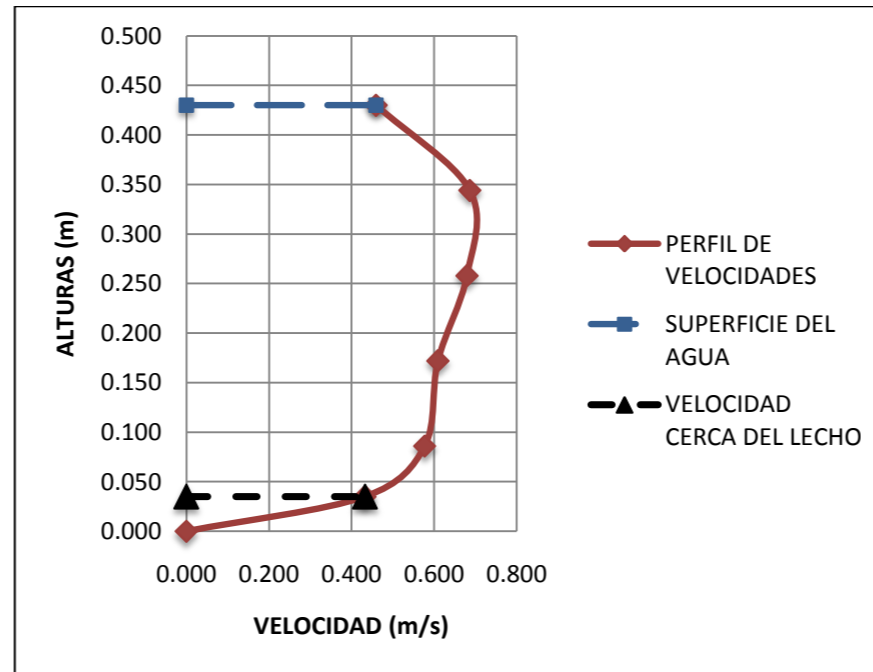
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. Perfil de velocidades, vertical 2, sección AR2.1



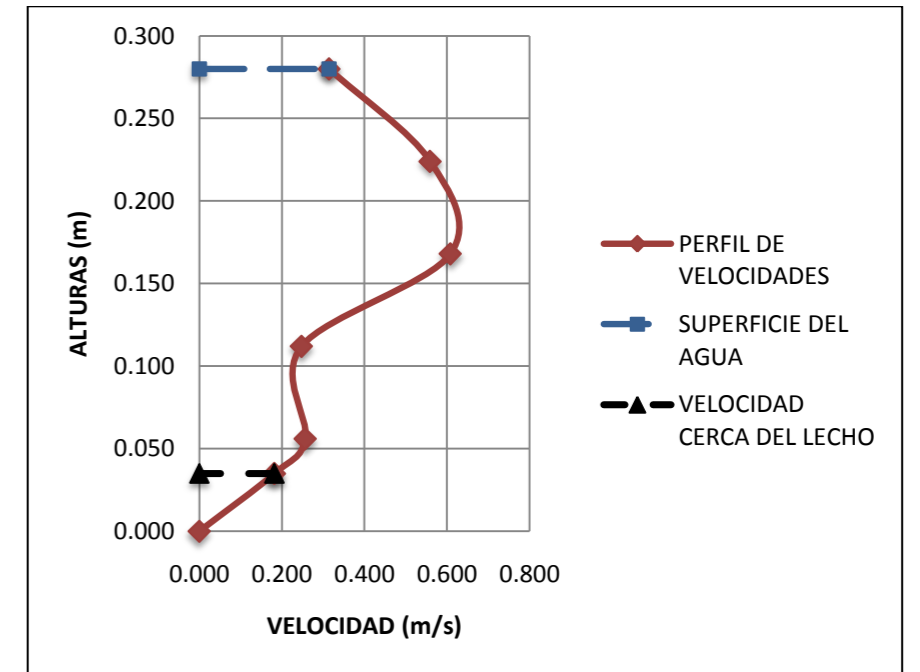
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AR2.1



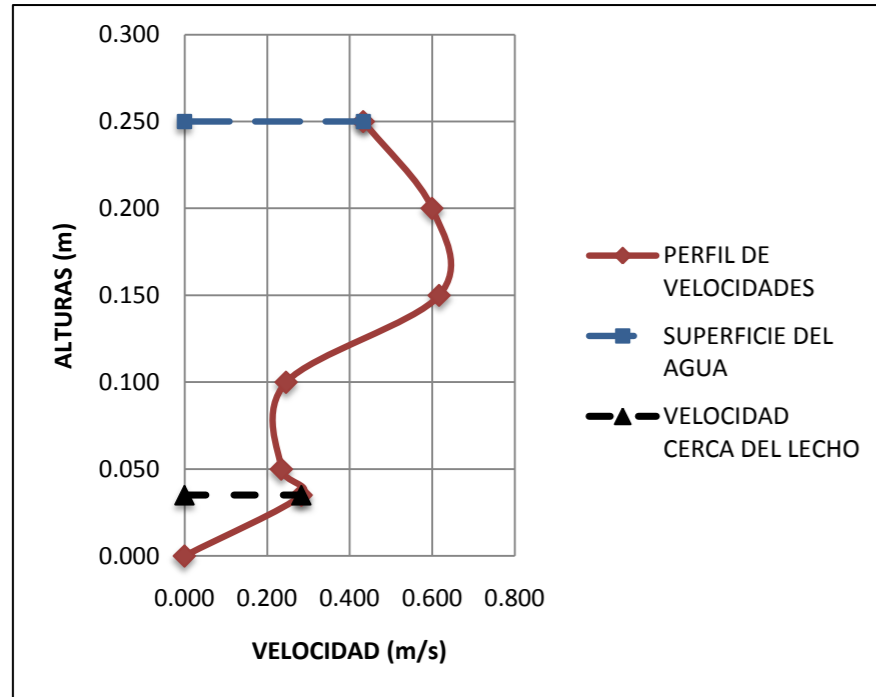
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. Perfil de velocidades, vertical 6, sección AR2.1



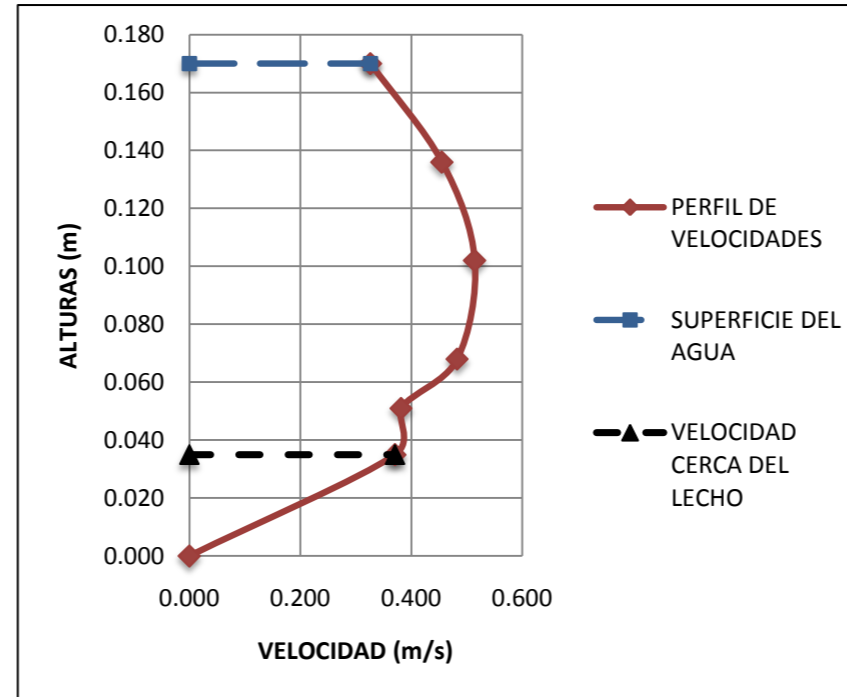
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. Perfil de velocidades, vertical 7, sección AR2.1



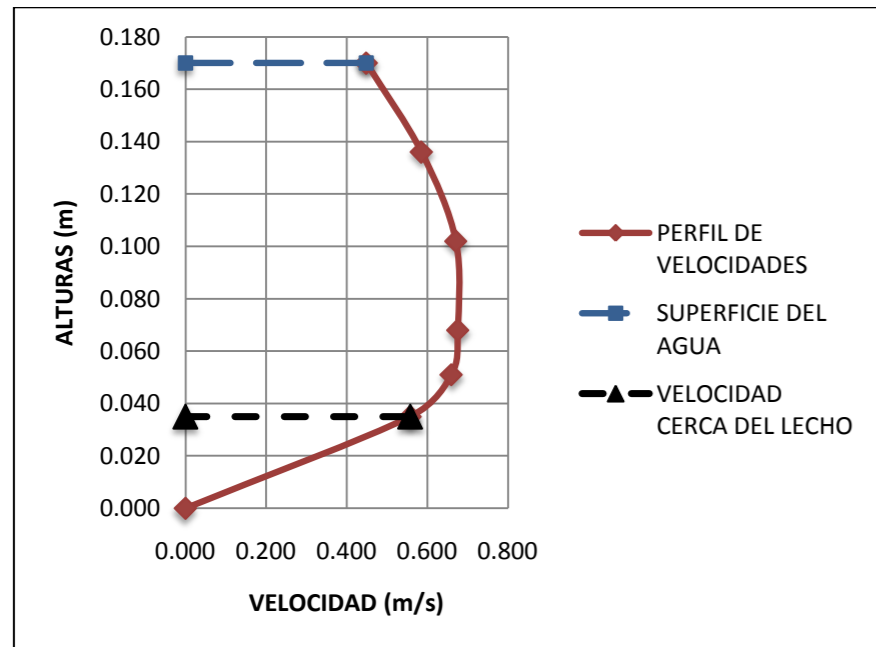
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Perfil de velocidades, vertical 9, sección AR2.1



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Perfil de velocidades, vertical 8, sección AR 2.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 123. Datos vertical 0, sección AR2.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.00	29.43	29.10	28.91	29.15	15	0.515	0.356	0.00
0.2-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.4-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.6-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.8-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Lecho	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 124. Velocidades medias, vertical 0, sección AR2.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	----	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	----	m/s
V _{m 2 ptos.}	----	m/s
V _{m 3 ptos.}	----	m/s
V _{m 5 ptos.}	----	m/s
V _{m 6 ptos. (distribución de velocidades)}	----	m/s
V _{m (método gráfico)}	----	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 125. Relación V_m/V_s, vertical 0, sección AR2.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	----
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	----
V _{m 2 ptos.}	----
V _{m 3 ptos.}	----
V _{m 5 ptos.}	----
V _{m 6 ptos. (distribución de velocidades)}	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 126. Datos vertical 1, sección AR2.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	20.86	21.00	20.72	20.86	15	0.719	0.496	0.540
0.2-H	0.108	14.19	14.29	13.75	14.08	15	1.066	0.734	0.432
0.4-H	0.216	19.00	18.97	18.91	18.96	20	1.055	0.727	0.324
0.6-H	0.324	15.24	15.34	15.36	15.31	15	0.980	0.675	0.216
0.8-H	0.432	23.00	23.00	23.02	23.01	15	0.652	0.450	0.108
Lecho	0.505	23.44	23.47	23.40	23.44	15	0.640	0.442	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 129. Datos vertical 2, sección AR2.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	20.80	20.90	20.86	20.85	10	0.480	0.332	0.320
0.2-H	0.064	14.71	14.63	14.58	14.64	10	0.683	0.472	0.256
0.4-H	0.128	17.73	17.71	17.71	17.72	15	0.847	0.584	0.192
0.6-H	0.192	11.40	11.56	11.54	11.50	10	0.870	0.600	0.128
0.8-H	0.256	31.24	31.16	31.03	31.14	10	0.321	0.223	0.064
Lecho	0.285	21.18	20.91	20.85	20.98	5	0.238	0.166	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 132. Datos vertical 3, sección AR2.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	22.67	22.90	22.81	22.79	10	0.44	0.304	0.430
0.2-H	0.086	14.32	14.41	14.36	14.36	10	0.70	0.481	0.344
0.4-H	0.172	20.46	20.75	20.38	20.53	15	0.73	0.504	0.258
0.6-H	0.258	13.03	12.94	12.90	12.96	10	0.77	0.532	0.172
0.8-H	0.344	15.86	15.94	15.87	15.89	10	0.63	0.435	0.086
Lecho	0.395	17.82	17.78	17.80	17.80	10	0.56	0.388	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 127. Velocidades medias, vertical 1, sección AR2.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.587	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.675	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.592	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.634	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.607	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.611	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.322	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 130. Velocidades medias, vertical 2, sección AR2.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.396	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.600	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.347	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.473	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.416	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.425	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.132	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 133. Velocidades medias, vertical 3, sección AR2.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.441	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.532	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.458	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.495	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.460	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.460	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.190	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 128. Relación V_m/V_s, vertical 1, sección AR2.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.184
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.360
V _{m 2 ptos.}	1.193
V _{m 3 ptos.}	1.277
V _{m 5 ptos.}	1.222
V _{m 6 ptos.}	1.231

Fuente: elaboración propia.

Tabla 131. Relación V_m/V_s, vertical 2, sección AR2.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.193
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.806
V _{m 2 ptos.}	1.047
V _{m 3 ptos.}	1.426
V _{m 5 ptos.}	1.253
V _{m 6 ptos.}	1.282

Fuente: elaboración propia.

Tabla 134. Relación V_m/V_s, vertical 3, sección AR2.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.450
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.752
V _{m 2 ptos.}	1.506
V _{m 3 ptos.}	1.629
V _{m 5 ptos.}	1.514
V _{m 6 ptos.}	1.512

Fuente: elaboración propia.

Tabla 153. Datos vertical 10, sección AR2.2

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.00	35.34	35.38	35.52	35.41	10	0.282	0.197	0.00
0.2-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.4-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.6-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.8-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Lecho	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 154. Velocidades medias, vertical 10, sección AR2.2

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	----	m/s
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	----	m/s
V _m 2 ptos.	----	m/s
V _m 3 ptos.	----	m/s
V _m 5 ptos.	----	m/s
V _m 6 ptos. (distribución de velocidades)	----	m/s
V _m (método gráfico)	----	m ² /s

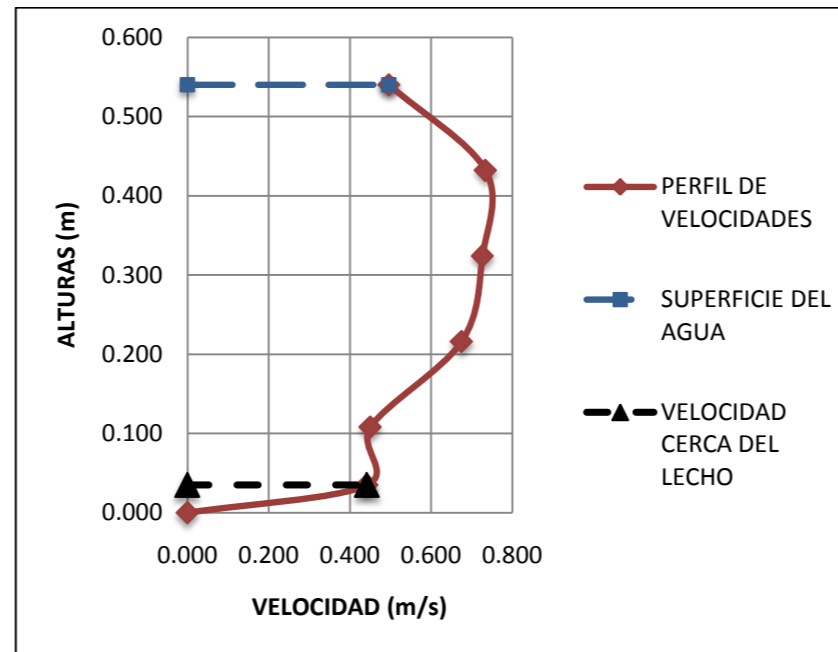
Fuente: elaboración propia.

Tabla 155. Relación V_m/V_s, vertical 10, sección AR2.2

	V _m /V _s
V _{promedio}	----
V _m 1 pto. (V _{0.6H})	----
V _m 2 ptos.	----
V _m 3 ptos.	----
V _m 5 ptos.	----
V _m 6 ptos. (distribución de velocidades)	----

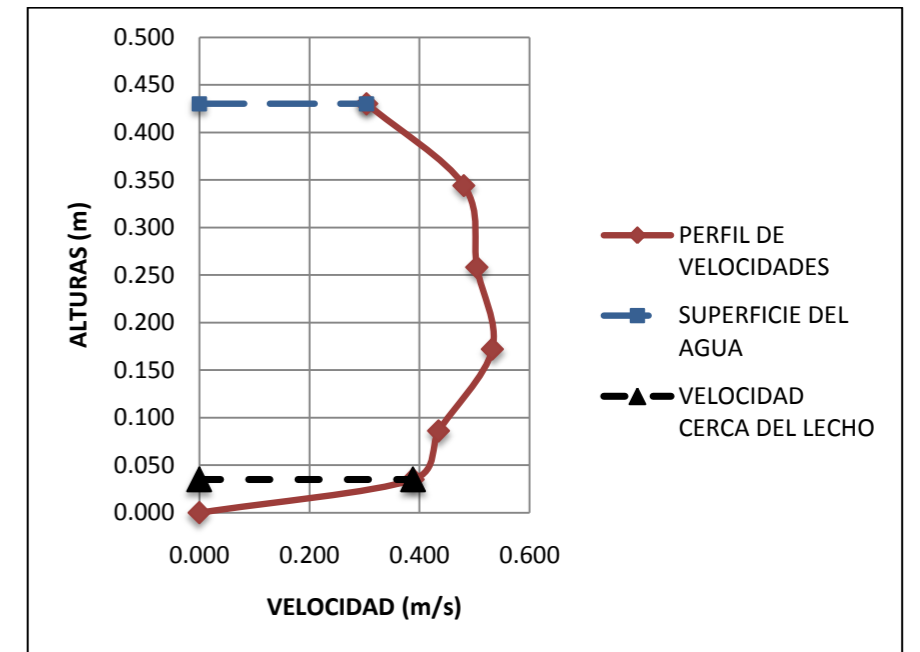
Fuente: elaboración propia.

Figura 63. Perfil de velocidades, vertical 1, sección AR2.2



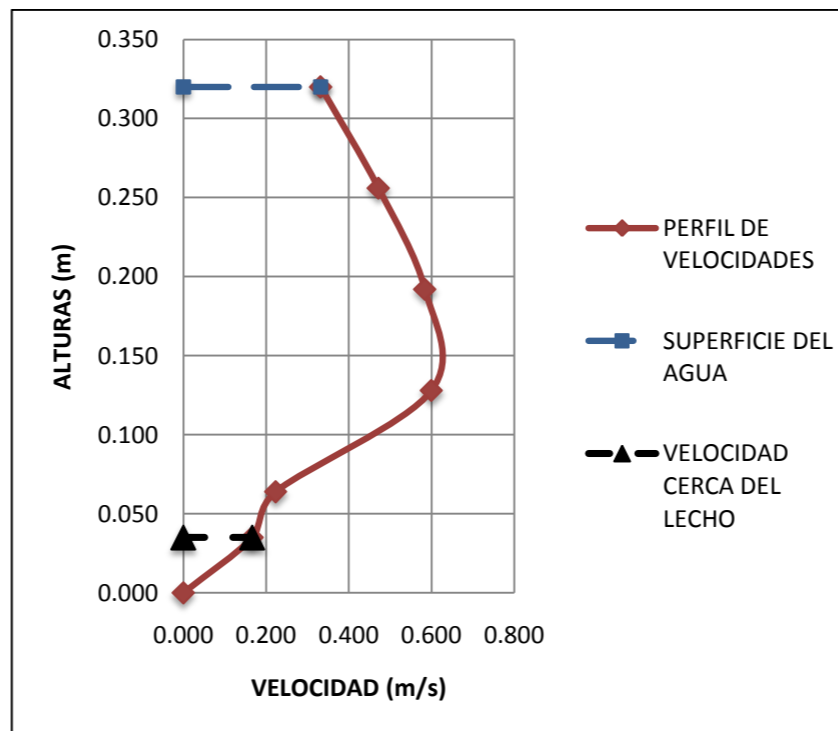
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Perfil de velocidades, vertical 3, sección AR2.2



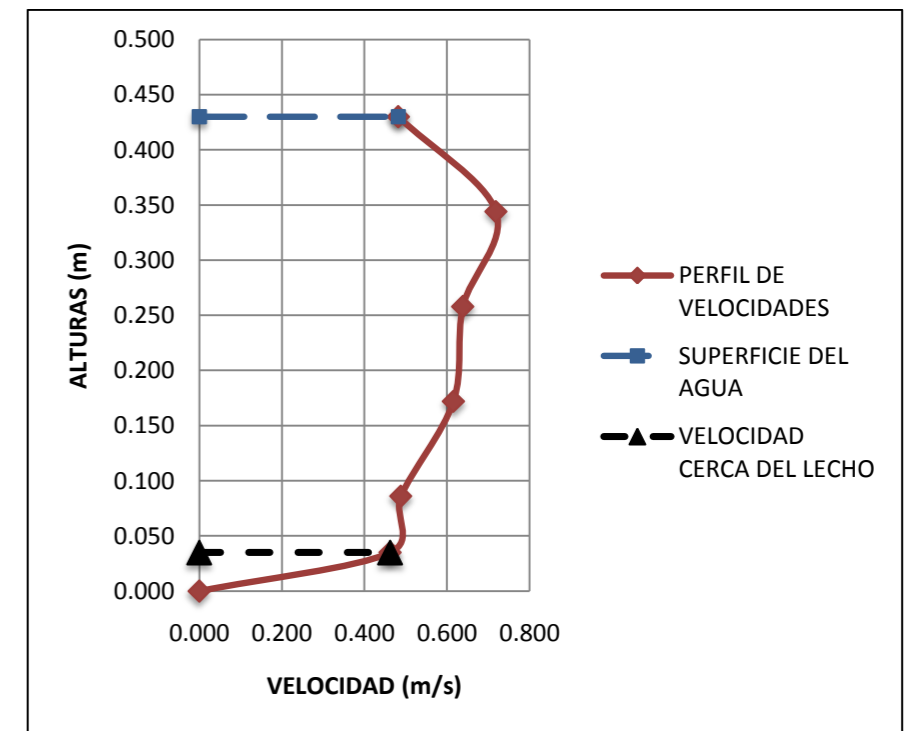
Fuente: elaboración propia.

Figura 64. Perfil de velocidades, vertical 2, sección AR2.2



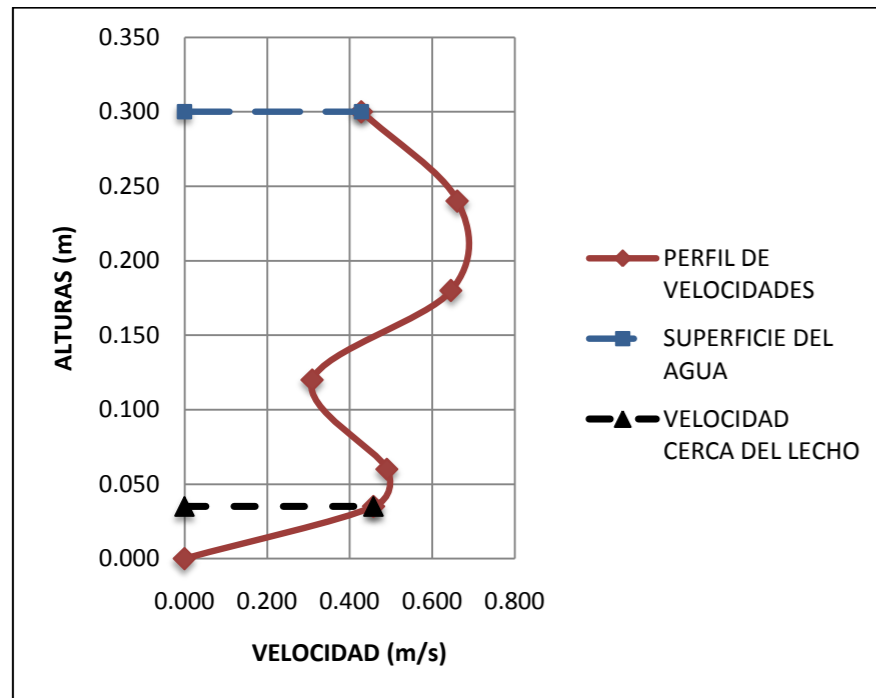
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AR2.2



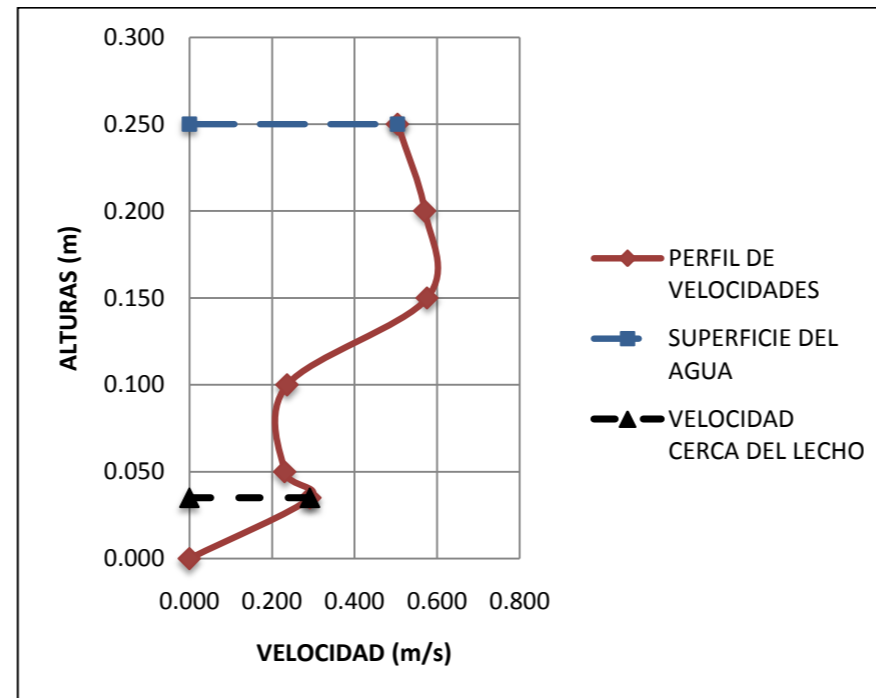
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Perfil de velocidades, vertical 5, sección AR2.2



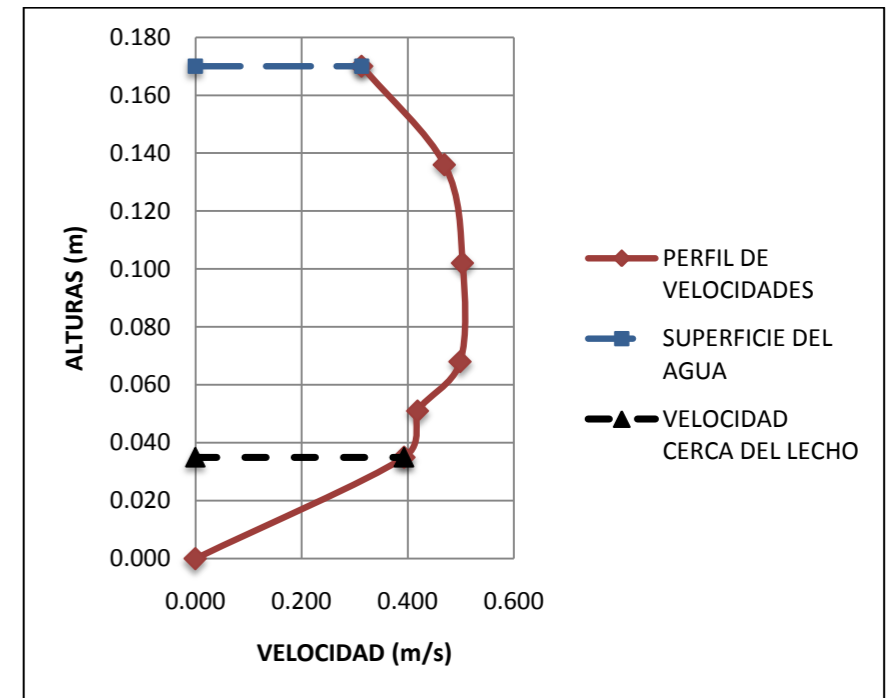
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. Perfil de velocidades, vertical 7, sección AR2.2



Fuente: elaboración propia.

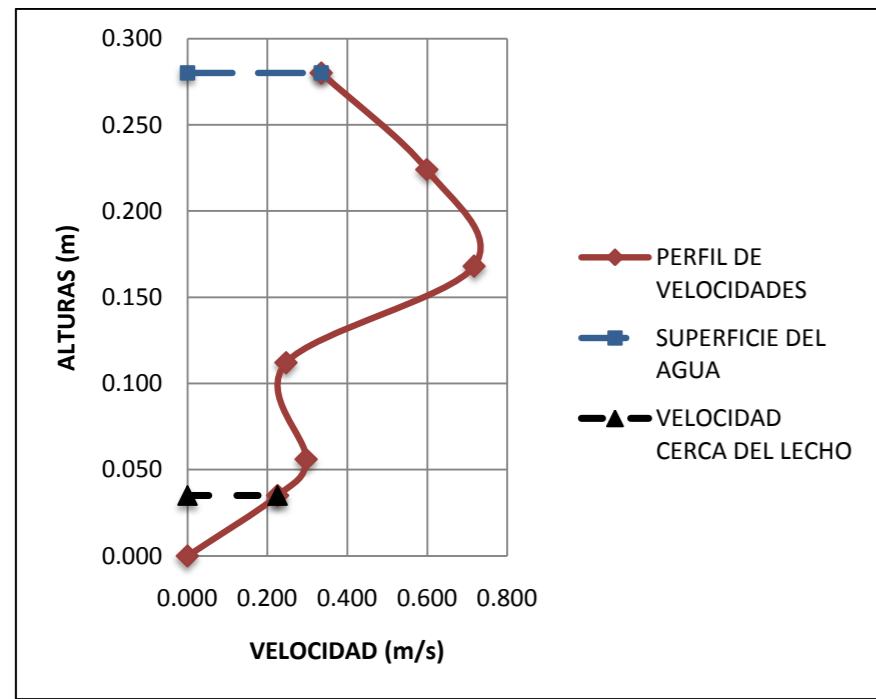
Figura 71. Perfil de velocidades, vertical 9, sección AR2.2



Fuente: elaboración propia.

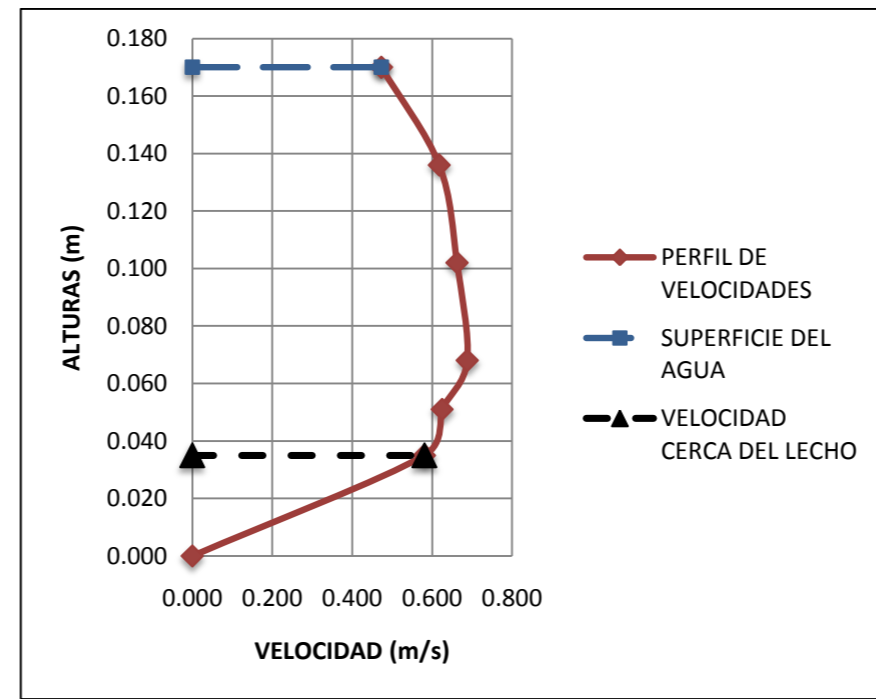
5

Figura 68. Perfil de velocidades, vertical 6, sección AR2.2



Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Perfil de velocidades, vertical 8, sección AR 2.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 156. Datos vertical 0, sección AA.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.00	33.01	35.41	33.25	33.89	5	0.148	0.104	0.00
0.2-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.4-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.6-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.8-H	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Lecho	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 159. Datos vertical 1, sección AA.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	45.91	43.00	44.00	44.30	20	0.451	0.313	0.360
0.2-H	0.072	39.26	39.62	40.81	39.90	15	0.376	0.261	0.288
0.4-H	0.144	38.99	39.04	24.37	34.13	15	0.439	0.304	0.216
0.6-H	0.216	35.49	35.00	21.53	30.67	15	0.489	0.338	0.144
0.8-H	0.288	44.90	44.63	43.12	44.22	15	0.339	0.236	0.072
Lecho	0.325	56.41	50.25	51.14	52.60	15	0.285	0.199	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 162. Datos vertical 2, sección AA.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	22.10	20.19	19.85	20.71	15	0.724	0.500	0.360
0.2-H	0.072	23.85	24.68	23.56	24.03	20	0.832	0.574	0.288
0.4-H	0.144	24.59	23.66	23.10	23.78	20	0.841	0.580	0.216
0.6-H	0.216	23.97	23.92	24.39	24.09	20	0.830	0.572	0.144
0.8-H	0.288	30.11	29.68	26.50	28.76	20	0.695	0.480	0.072
Lecho	0.325	34.11	30.84	34.82	33.26	15	0.451	0.312	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 157. Velocidades medias, vertical 0, sección AA.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	----	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	----	m/s
V _{m 2 ptos.}	----	m/s
V _{m 3 ptos.}	----	m/s
V _{m 5 ptos.}	----	m/s
V _{m 6 ptos.}	----	m/s
V _{m (método gráfico)}	----	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 160. Velocidades medias, vertical 1, sección AA.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.275	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.338	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.248	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.293	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.278	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.279	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.096	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 163. Velocidades medias, vertical 2, sección AA.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.503	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.572	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.527	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.550	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.521	m/s
V _{m 6 ptos.}	0.522	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.180	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 158. Relación V_m/V_s, vertical 0, sección AA.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	----
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	----
V _{m 2 ptos.}	----
V _{m 3 ptos.}	----
V _{m 5 ptos.}	----
V _{m 6 ptos.}	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 161. Relación V_m/V_s, vertical 1, sección AA.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	0.880
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.082
V _{m 2 ptos.}	0.794
V _{m 3 ptos.}	0.938
V _{m 5 ptos.}	0.889
V _{m 6 ptos.}	0.892

Fuente: elaboración propia.

Tabla 164. Relación V_m/V_s, vertical 2, sección AA.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.007
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.145
V _{m 2 ptos.}	1.054
V _{m 3 ptos.}	1.100
V _{m 5 ptos.}	1.043
V _{m 6 ptos.}	1.045

Fuente: elaboración propia.

Tabla 183. Datos vertical 9, sección AA.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	21.77	20.04	18.67	20.16	10	0.496	0.343	0.280
0.2-H	0.056	23.12	23.31	24.13	23.52	15	0.638	0.441	0.224
0.4-H	0.112	25.58	26.20	27.16	26.31	15	0.570	0.394	0.168
0.6-H	0.168	29.99	29.33	29.35	29.56	15	0.507	0.351	0.112
0.8-H	0.224	26.04	25.44	36.68	29.39	15	0.510	0.353	0.056
Lecho	0.245	23.94	39.36	48.20	37.17	15	0.404	0.280	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 184. Velocidades medias, vertical 9, sección AA.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.360	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.351	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.397	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.374	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.370	m/s
V _{m 6 ptos. (distribución de velocidades)}	0.370	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.097	m ² /s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 185. Relación V_m/V_s, vertical 9, sección AA.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	1.050
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	1.023
V _{m 2 ptos.}	1.156
V _{m 3 ptos.}	1.089
V _{m 5 ptos.}	1.079
V _{m 6 ptos. (distribución de velocidades)}	1.078

Fuente: elaboración propia.

Tabla 186. Datos vertical 10, sección AA.1

	Prof.	t ₁	t ₂	t ₃	t _{prom}	Rev	Rev/s	V	Altura
Sup.	0.000	23.43	33.09	42.72	33.08	5	0.151	0.107	0.340
0.2-H	0.068	17.80	14.74	14.79	15.78	5	0.317	0.220	0.272
0.4-H	0.136	16.25	12.95	10.55	13.25	5	0.377	0.262	0.204
0.6-H	0.204	12.92	10.81	12.43	12.05	5	0.415	0.288	0.136
0.8-H	0.272	13.16	12.21	11.19	12.19	5	0.410	0.284	0.068
Lecho	0.305	13.11	15.32	16.75	15.06	5	0.332	0.231	0.035

Fuente: elaboración propia.

Tabla 187. Velocidades medias, vertical 10, sección AA.1

	Velocidad media	Unidades
V _{promedio}	0.232	m/s
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	0.288	m/s
V _{m 2 ptos.}	0.252	m/s
V _{m 3 ptos.}	0.270	m/s
V _{m 5 ptos.}	0.243	m/s
V _{m 6 ptos. (distribución de velocidades)}	0.245	m/s
V _{m (método gráfico)}	0.078	m ² /s

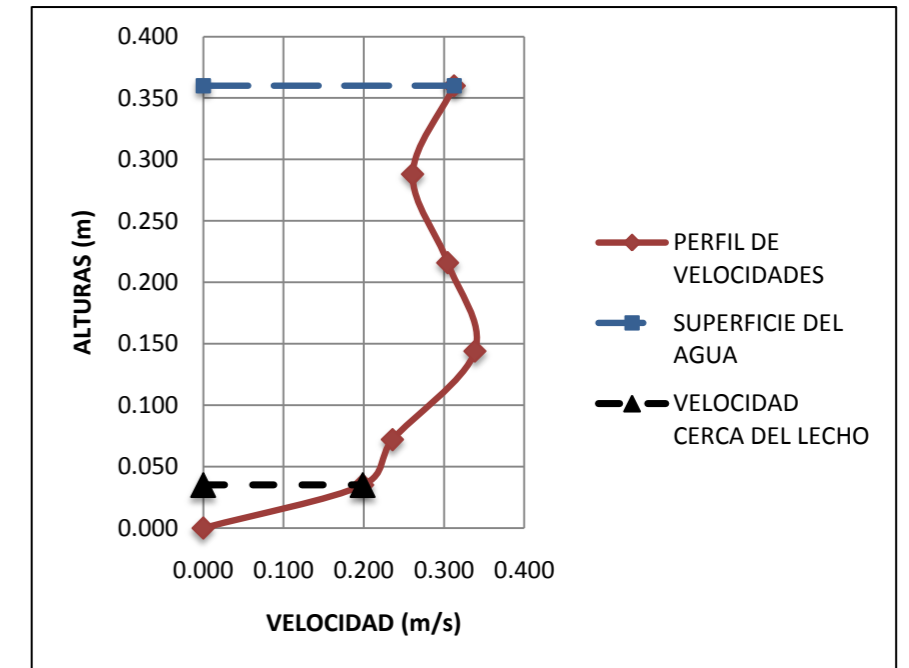
Fuente: elaboración propia.

Tabla 188. Relación V_m/V_s, vertical 10, sección AA.1

	V _m /V _s
V _{promedio}	2.174
V _{m 1 pto. (V_{0.6H})}	2.695
V _{m 2 ptos.}	2.366
V _{m 3 ptos.}	2.531
V _{m 5 ptos.}	2.278
V _{m 6 ptos. (distribución de velocidades)}	2.293

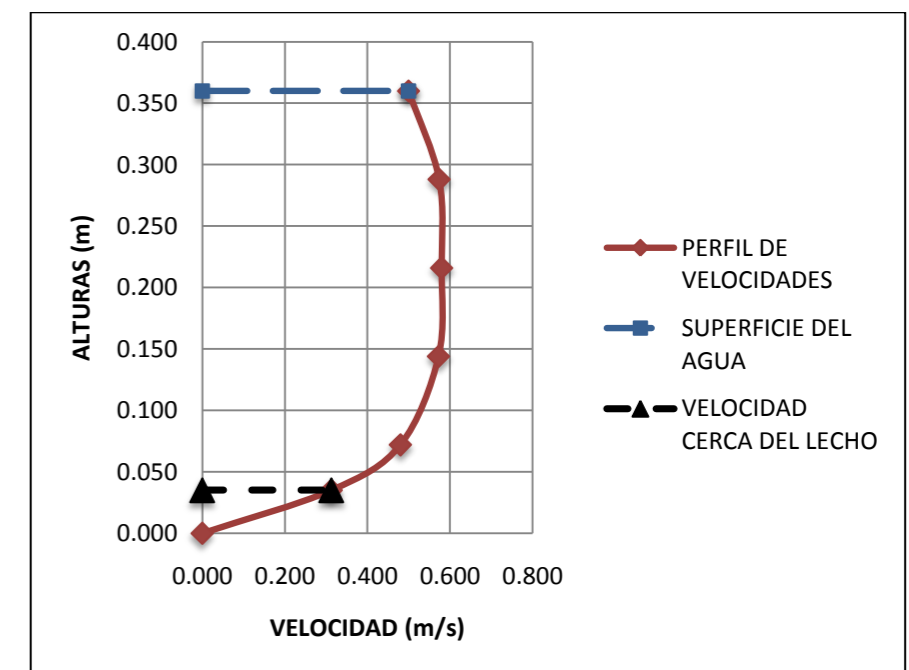
Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Perfil de velocidades, vertical 1, sección AA.1



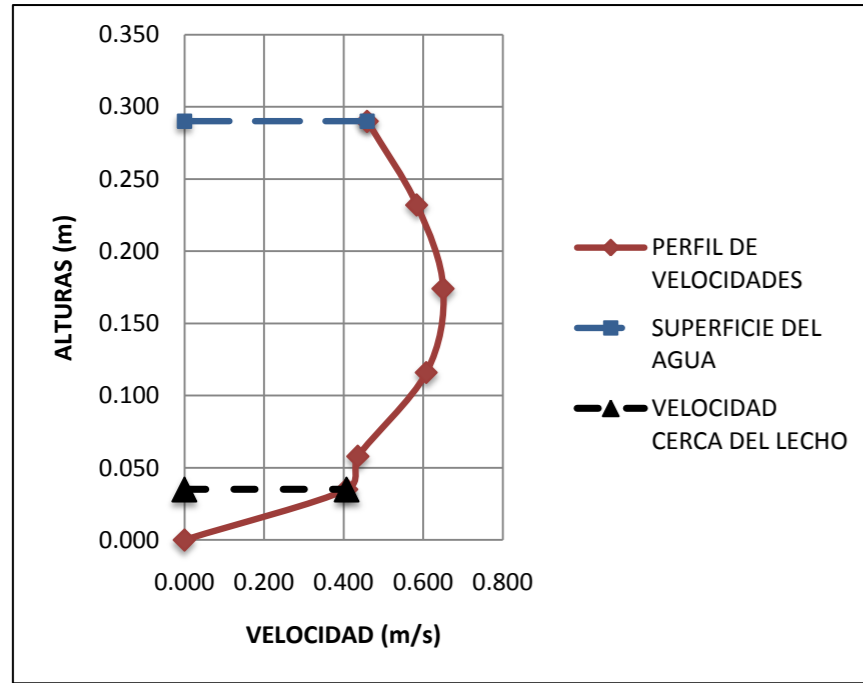
Fuente: elaboración propia.

Figura 73. Perfil de velocidades, vertical 2, sección AA.1



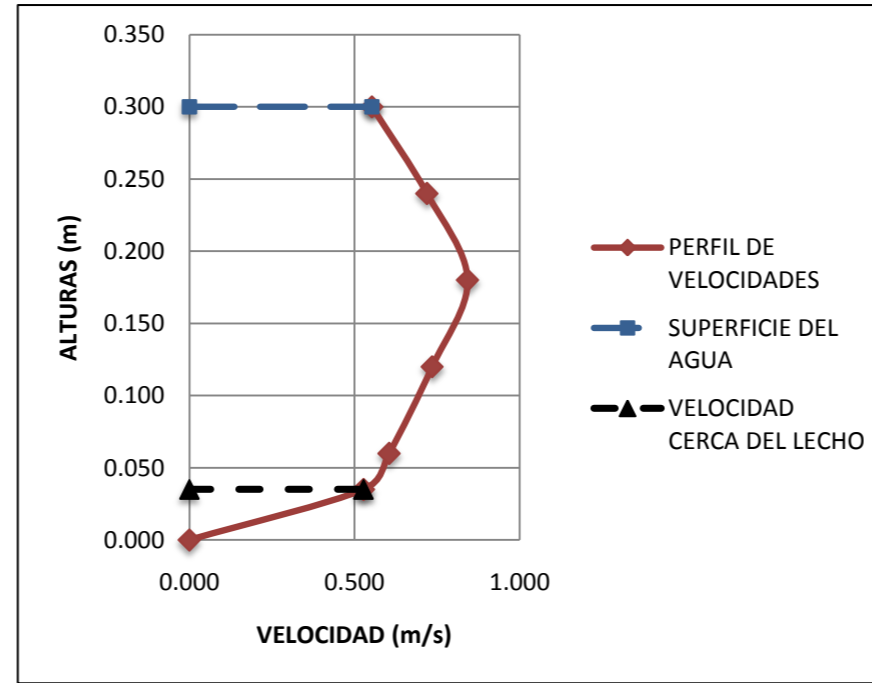
Fuente: elaboración propia.

Figura 74. Perfil de velocidades, vertical 3, sección AA.1



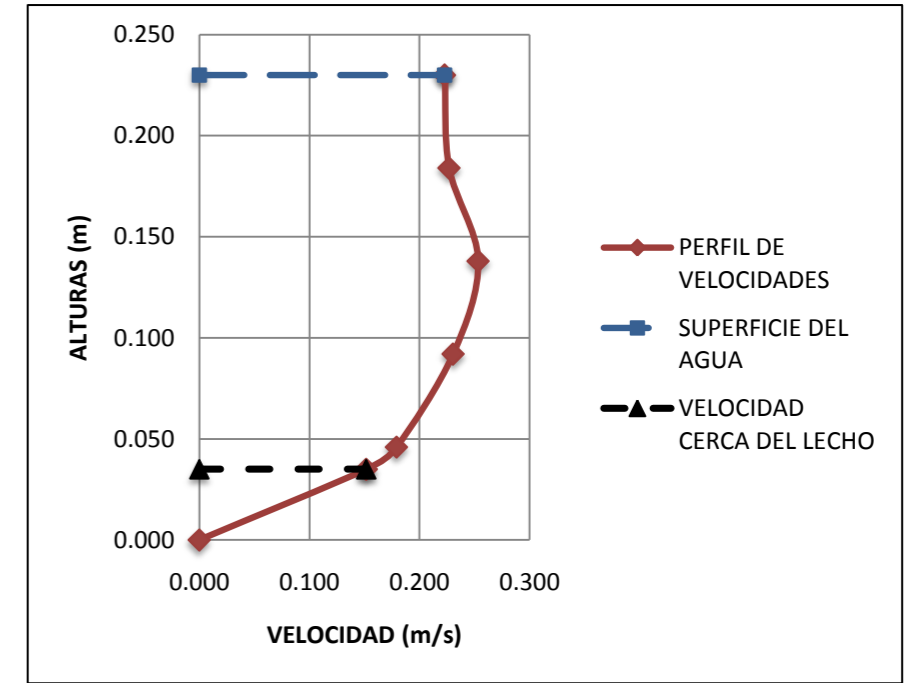
Fuente: elaboración propia.

Figura 76. Perfil de velocidades, vertical 5, sección AA.1



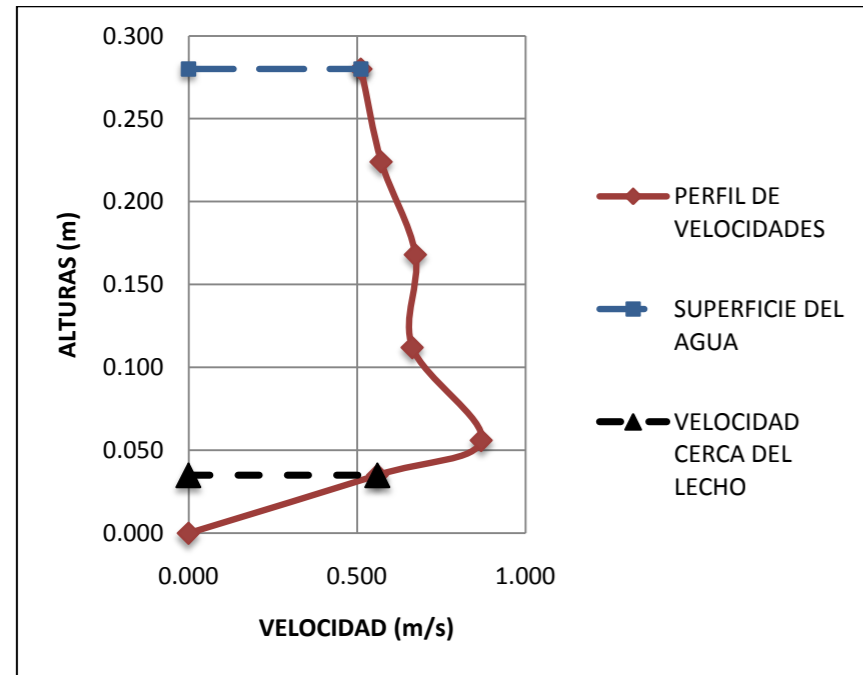
Fuente: elaboración propia.

Figura 78. Perfil de velocidades, vertical 7, sección AA.1



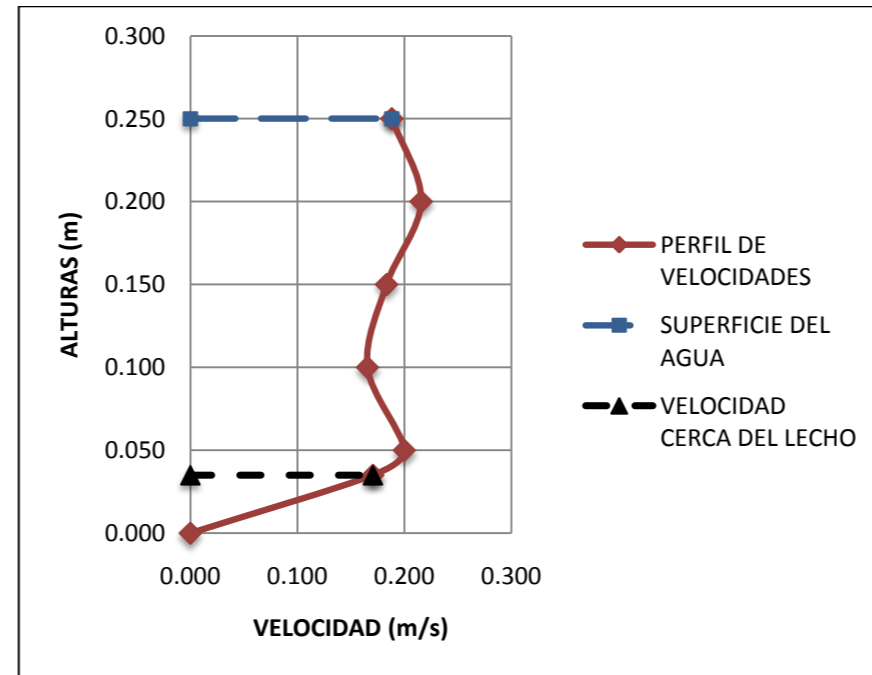
Fuente: elaboración propia.

Figura 75. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AA.1



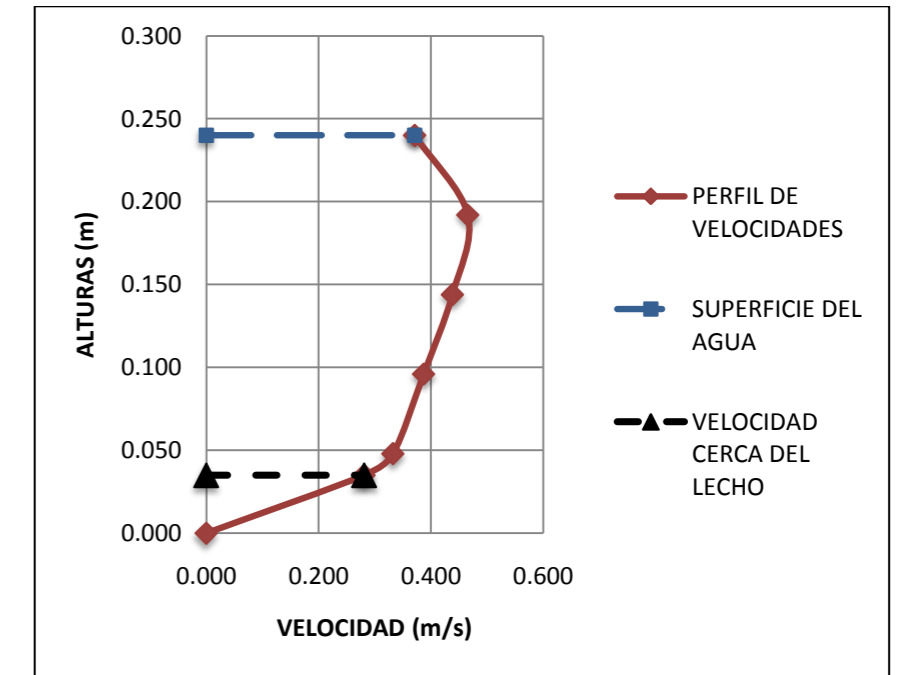
Fuente: elaboración propia.

Figura 77. Perfil de velocidades, vertical 6, sección AA.1



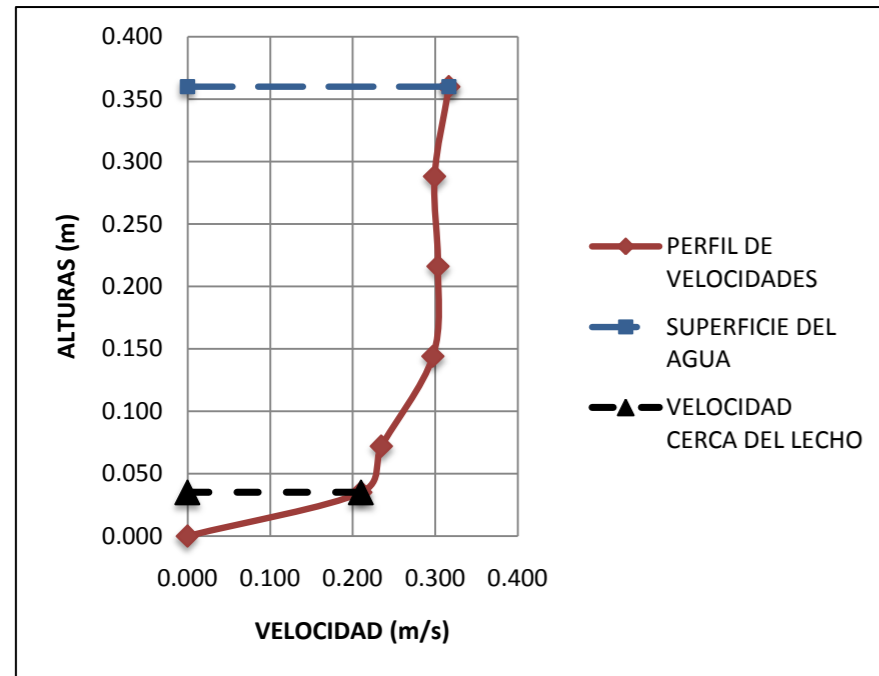
Fuente: elaboración propia.

Figura 79. Perfil de velocidades, vertical 8, sección AA.1



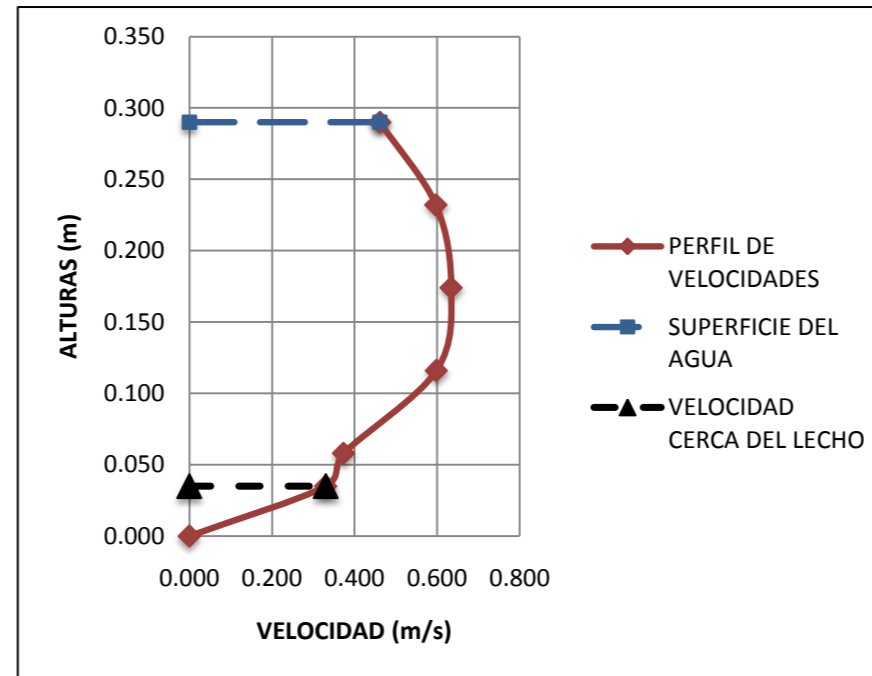
Fuente: elaboración propia.

Figura 82. Perfil de velocidades, vertical 1, sección AA.2



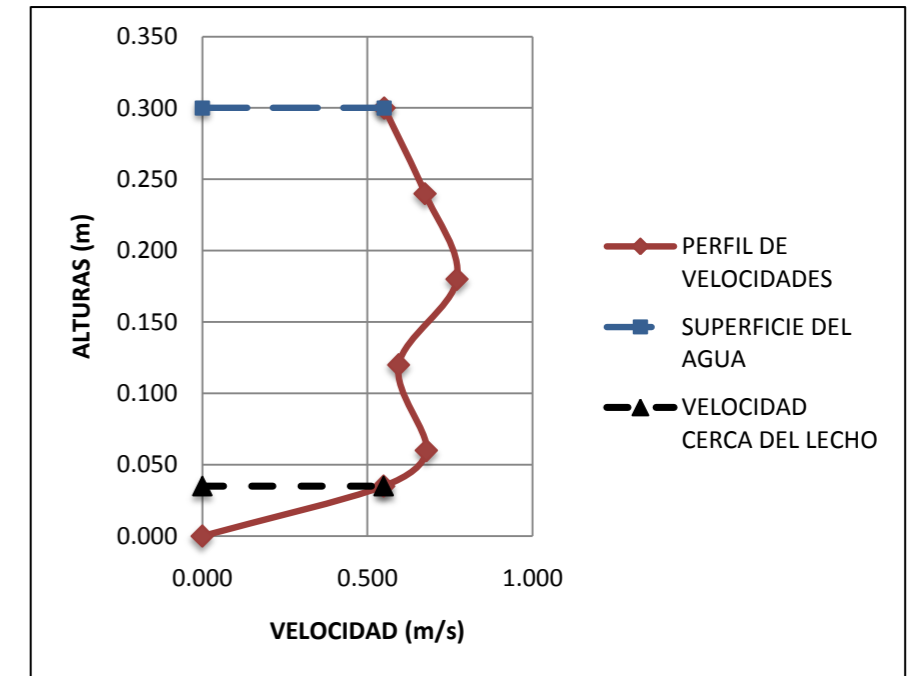
Fuente: elaboración propia.

Figura 84. Perfil de velocidades, vertical 3, sección AA.2



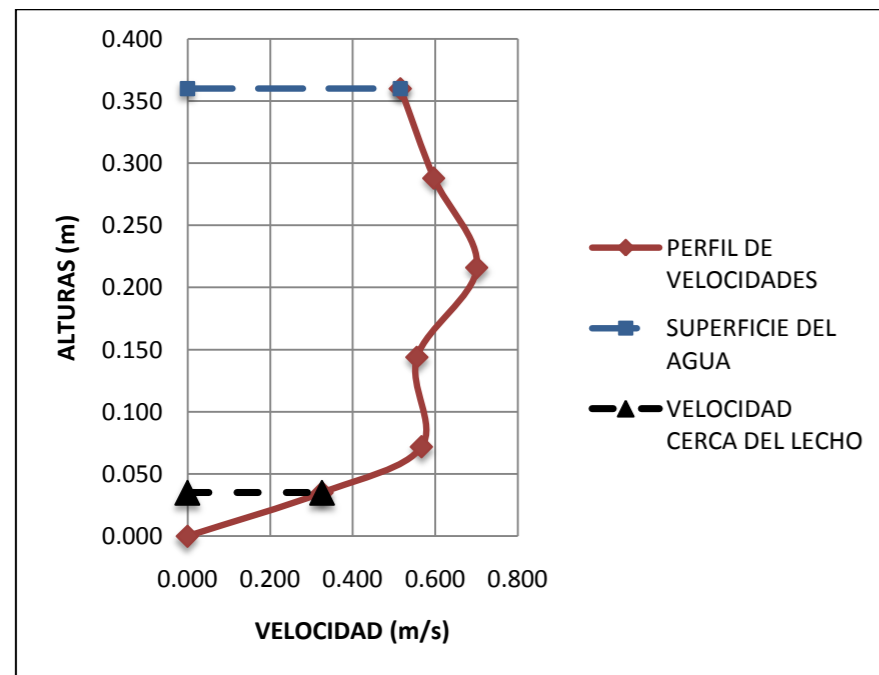
Fuente: elaboración propia.

Figura 86. Perfil de velocidades, vertical 5, sección AA.2



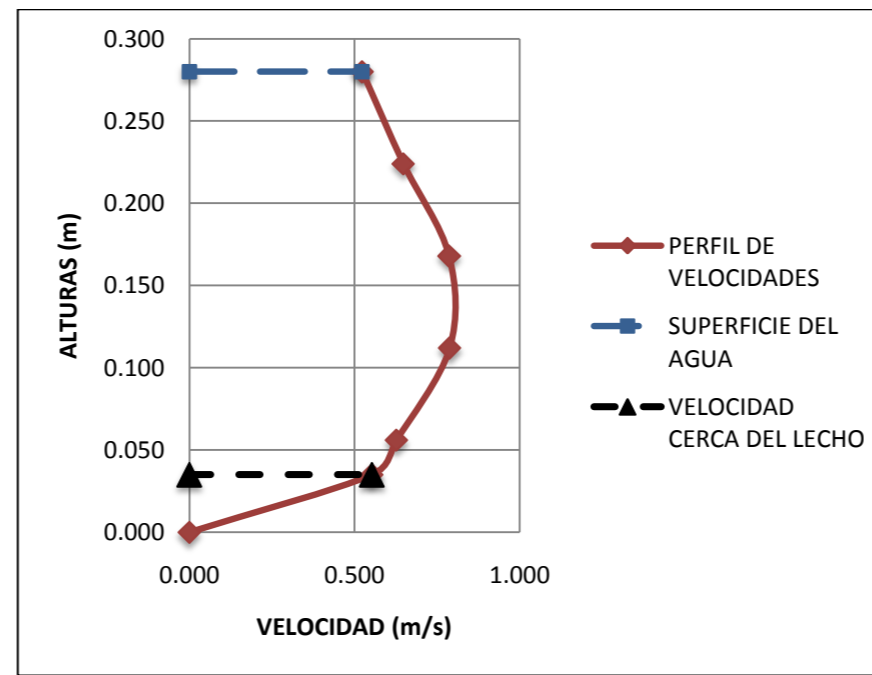
Fuente: elaboración propia.

Figura 83. Perfil de velocidades, vertical 2, sección AA.2



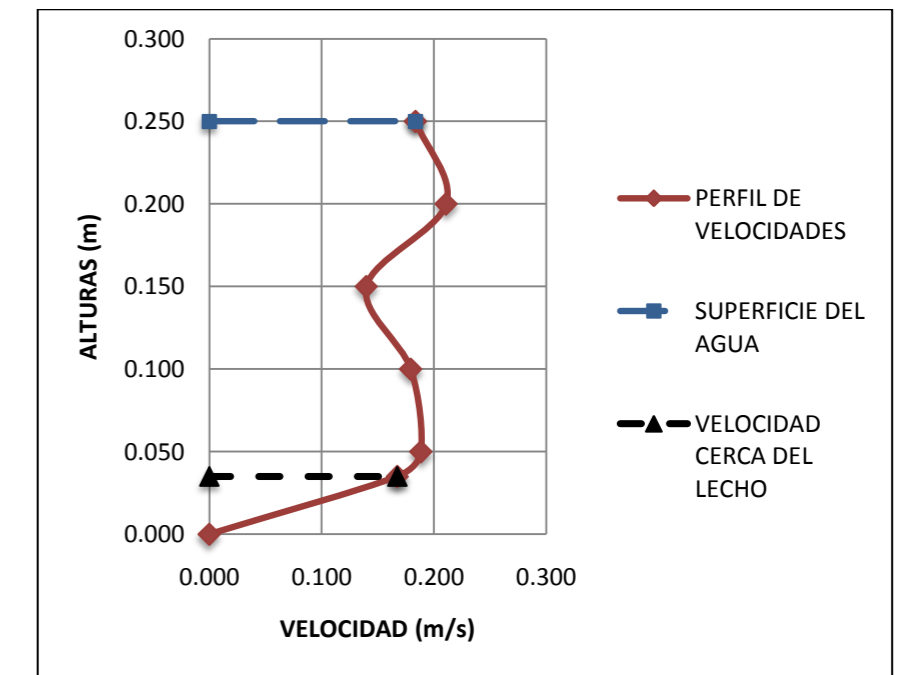
Fuente: elaboración propia.

Figura 85. Perfil de velocidades, vertical 4, sección AA.2



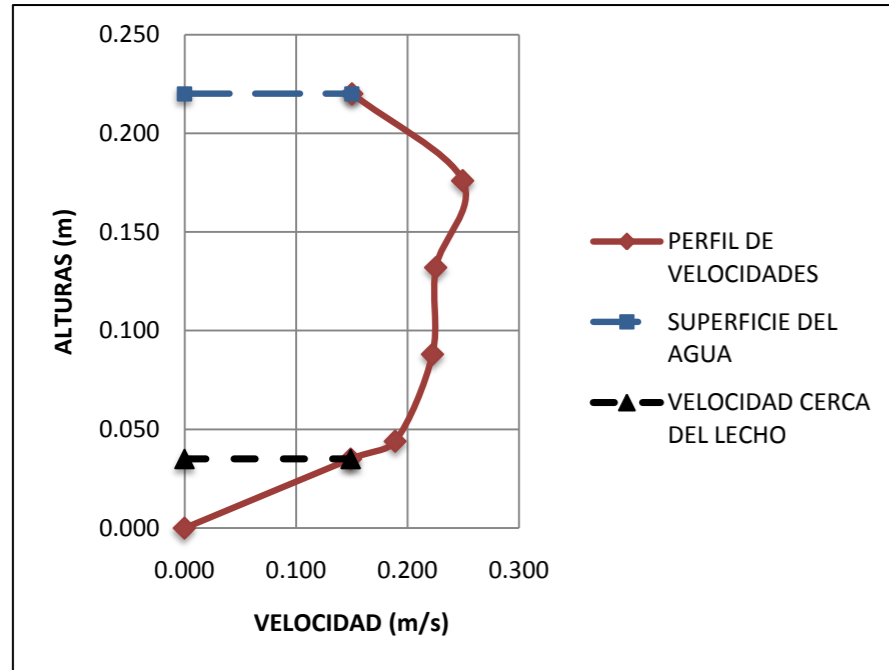
Fuente: elaboración propia.

Figura 87. Perfil de velocidades, vertical 6, sección AA.2



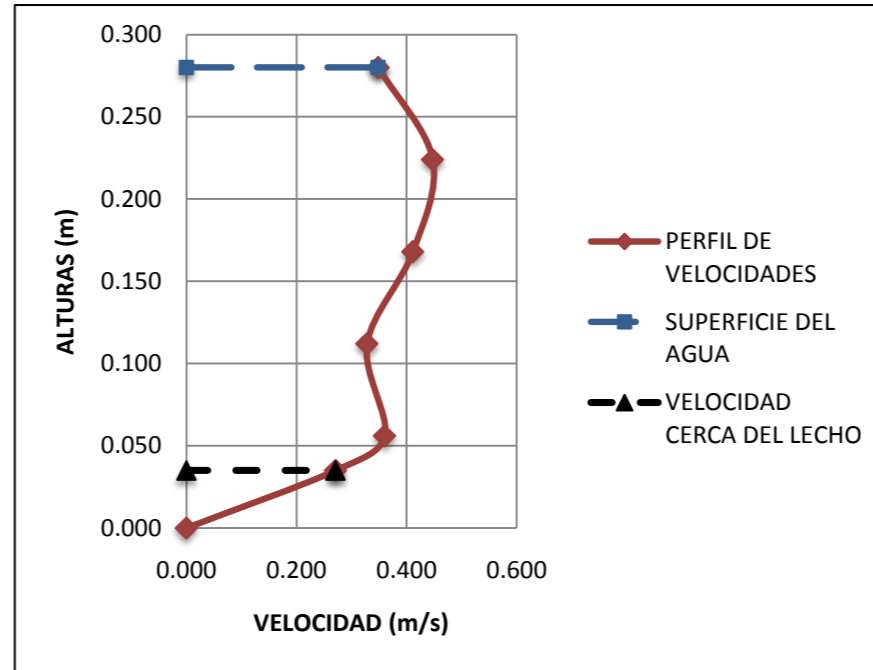
Fuente: elaboración propia.

Figura 88. Perfil de velocidades, vertical 7, sección AA.2



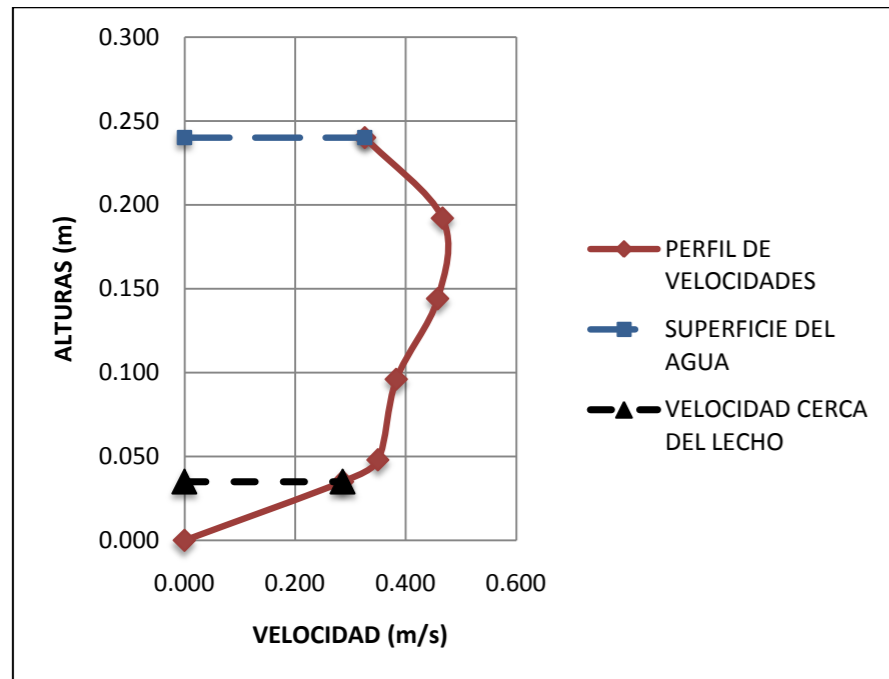
Fuente: elaboración propia.

Figura 90. Perfil de velocidades, vertical 9, sección AA.2



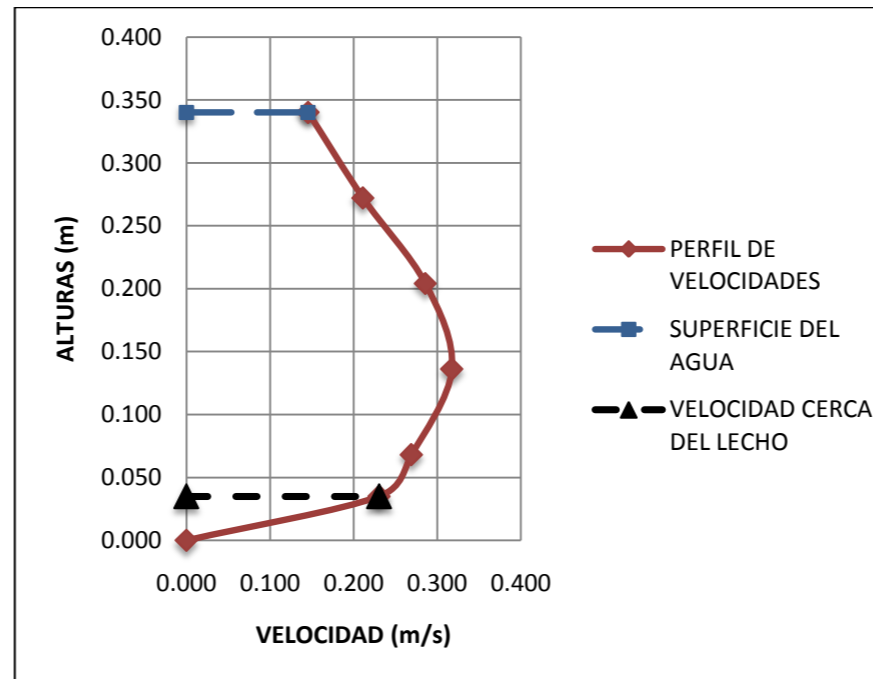
Fuente: elaboración propia.

Figura 89. Perfil de velocidades, vertical 8, sección AA.2



Fuente: elaboración propia.

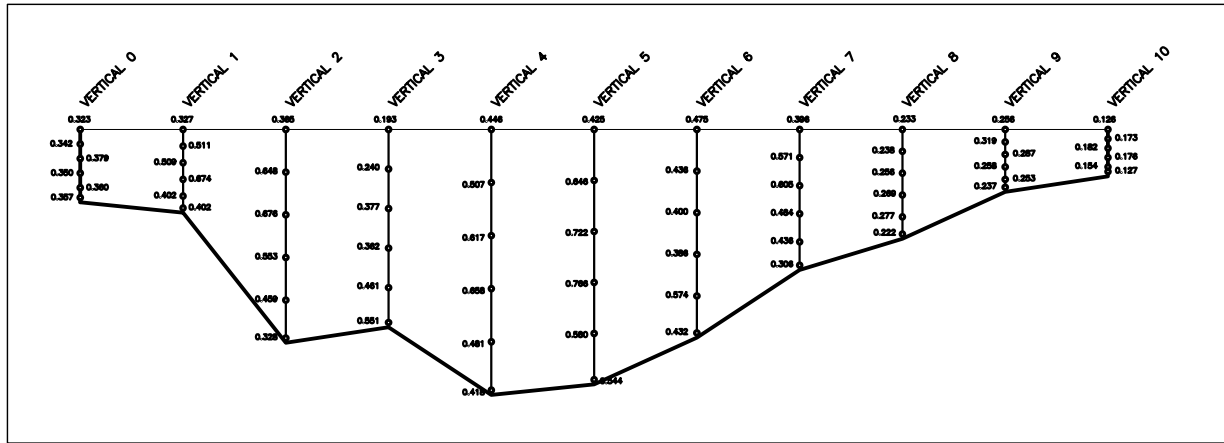
Figura 91. Perfil de velocidades, vertical 10, sección AA.2



Fuente: elaboración propia.

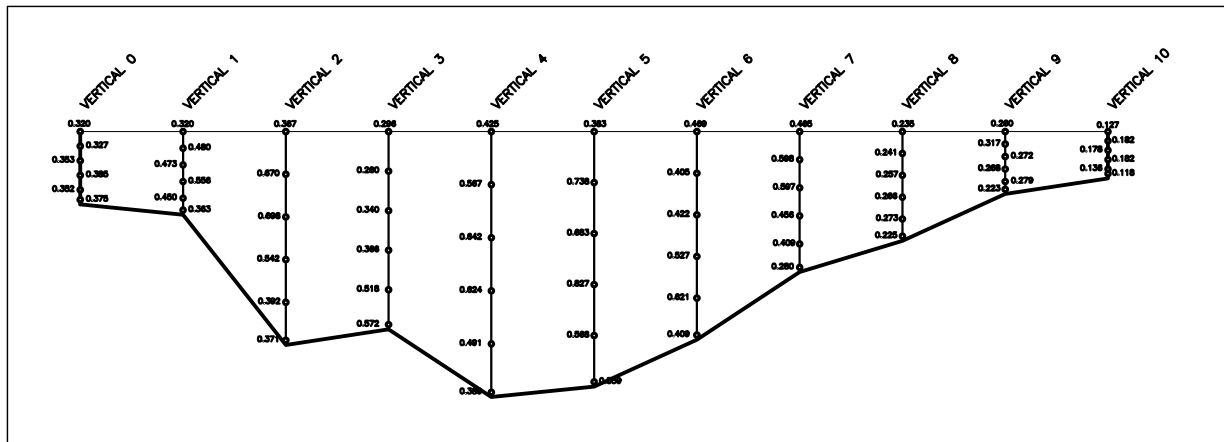
ANEXOS

Figura 92. Velocidades para sección AR1.1



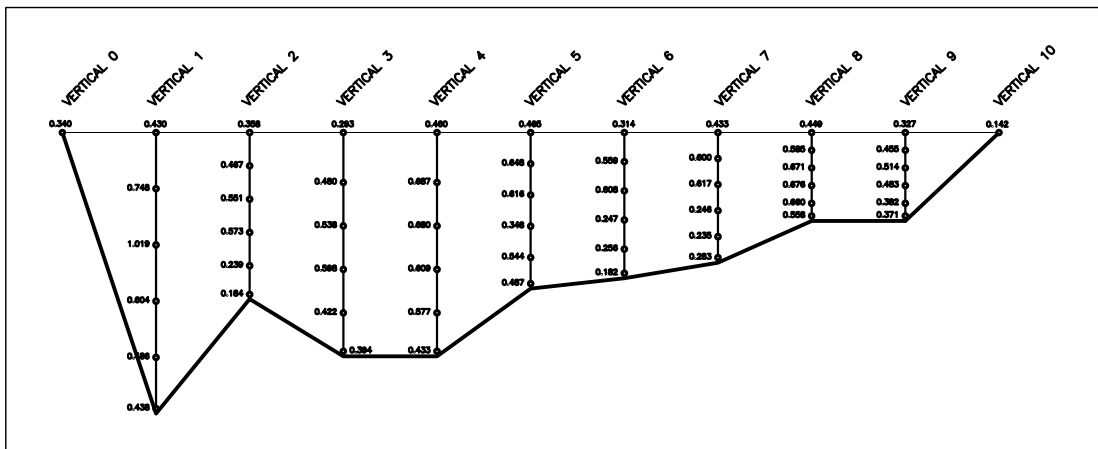
Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 93. Velocidades para sección AR1.2



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

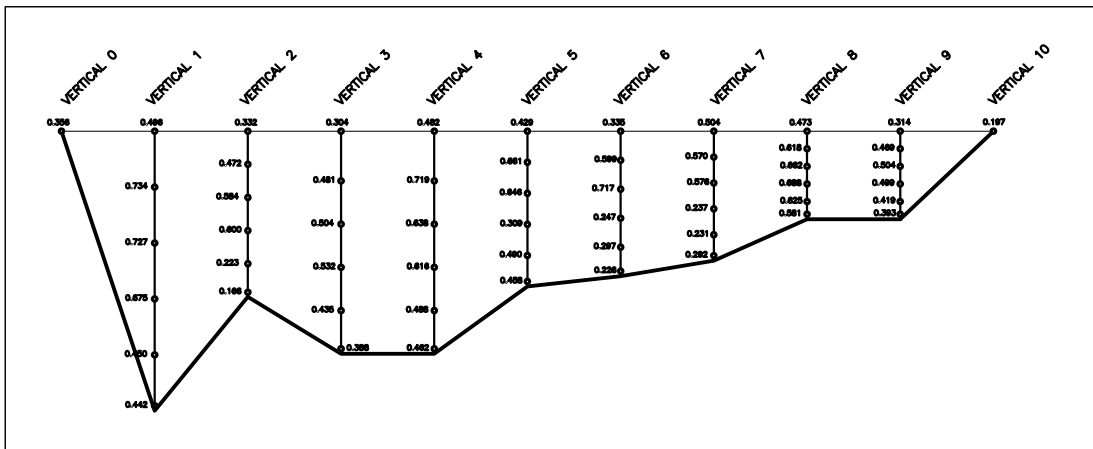
Figura 94. Velocidades para sección AR2.1



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

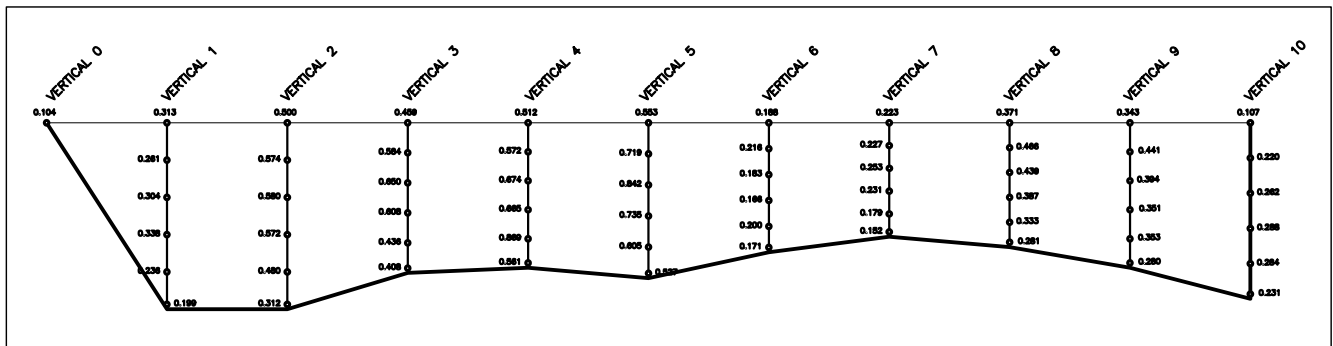
ANEXOS

Figura 95. Velocidades para sección AR2.2



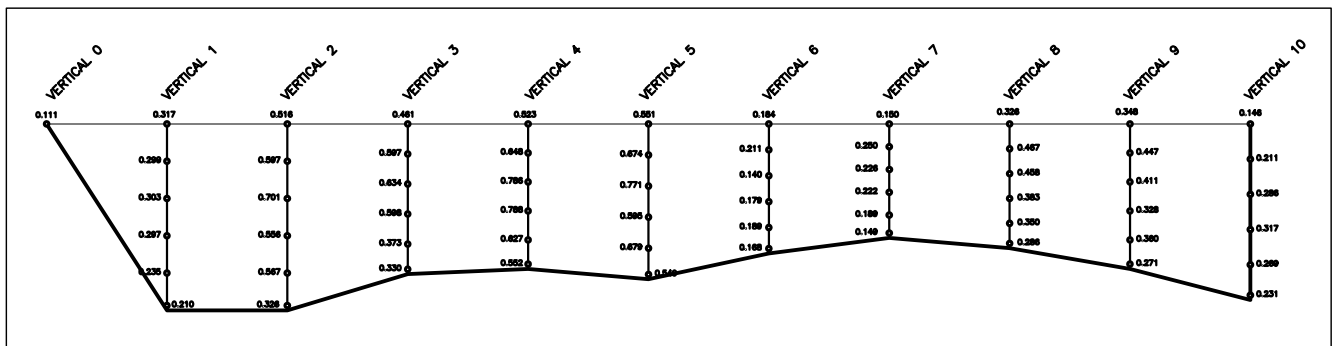
Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 96. Velocidades para sección AA.1



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

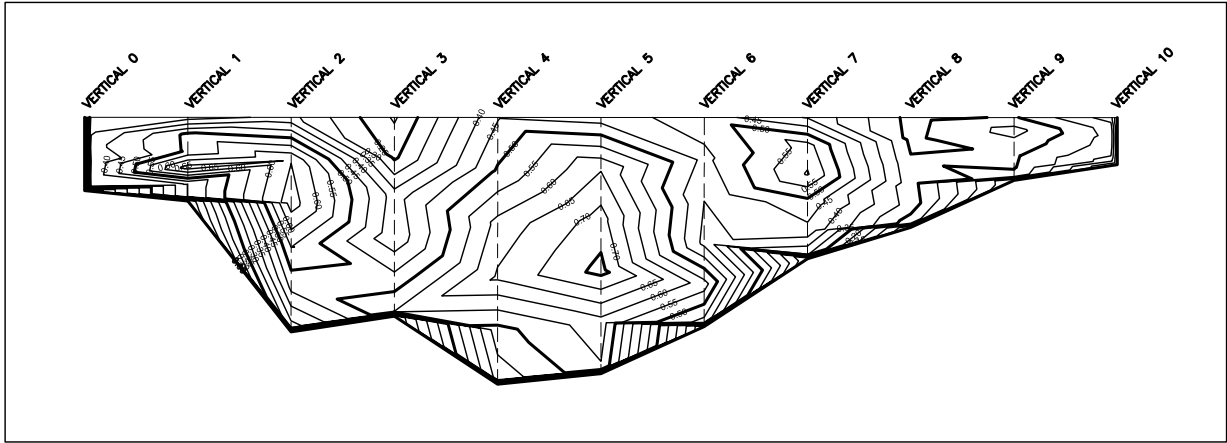
Figura 97. Velocidades para sección AA.2



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

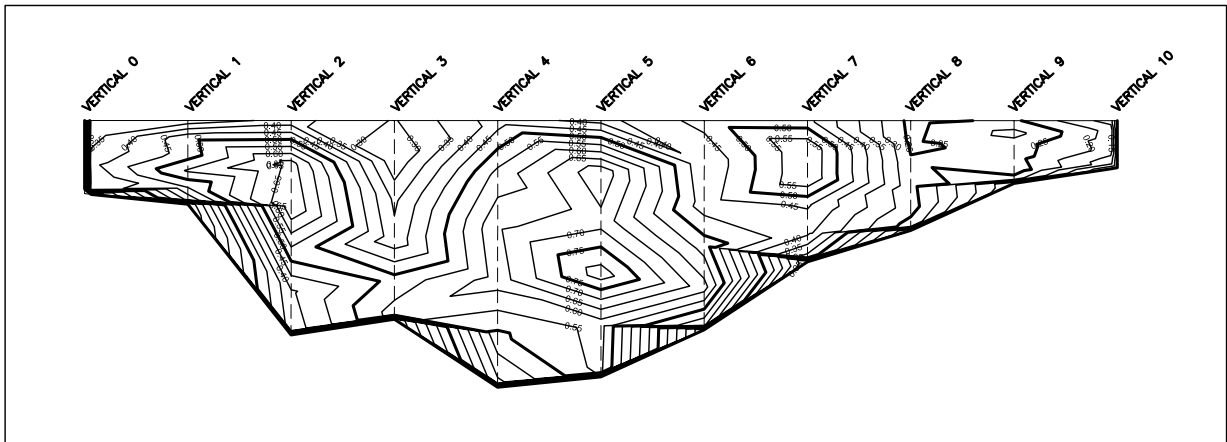
ANEXOS

Figura 98. Isotacas para sección AR1.1



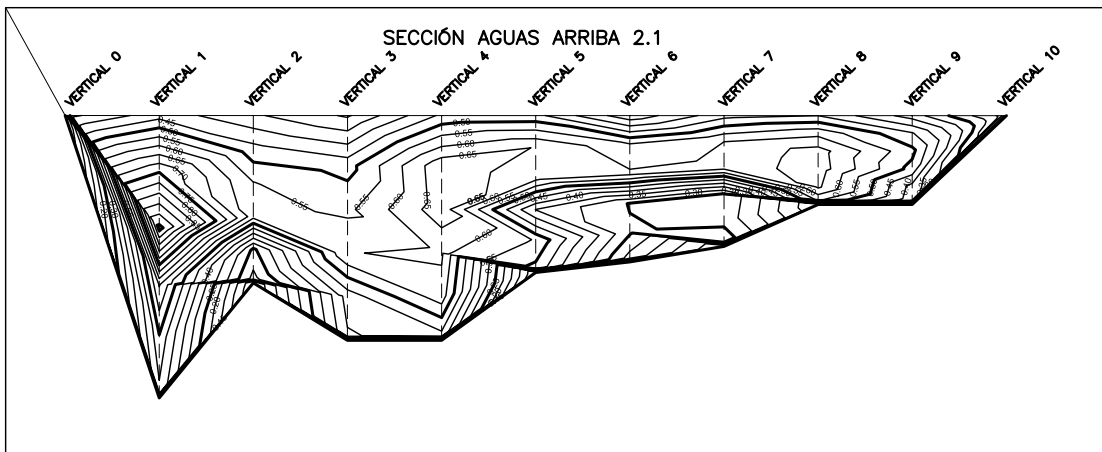
Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 99. Isotacas para sección AR1.2



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

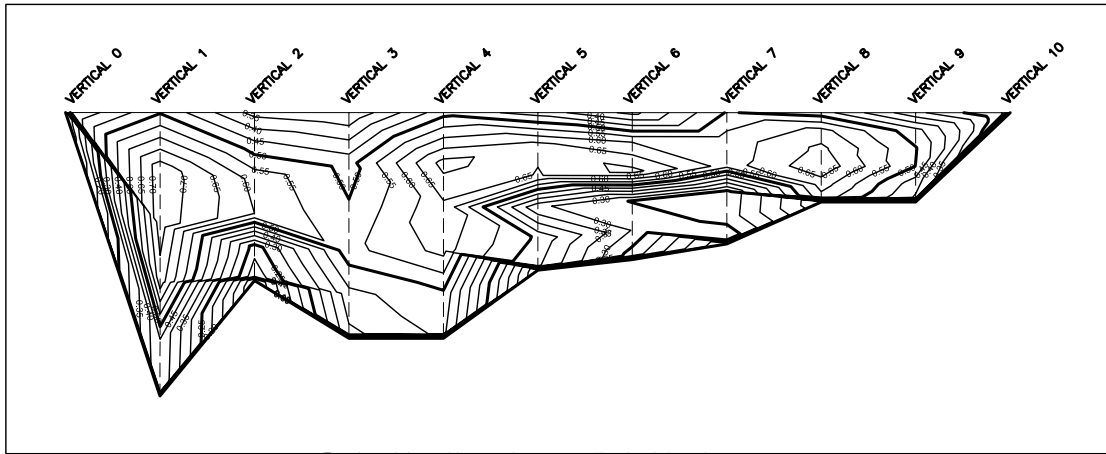
Figura 100. Isotacas para sección AR2.1



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

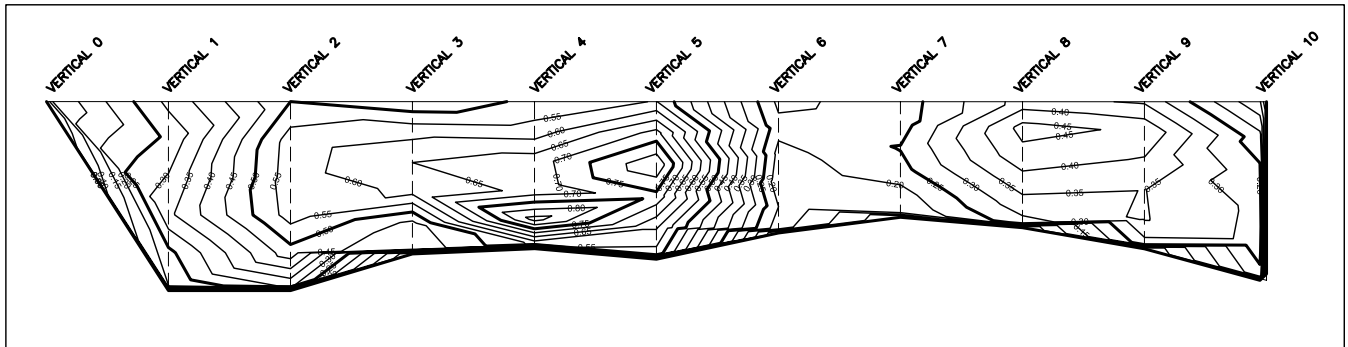
ANEXOS

Figura 101. Isotacas para sección AR2.2



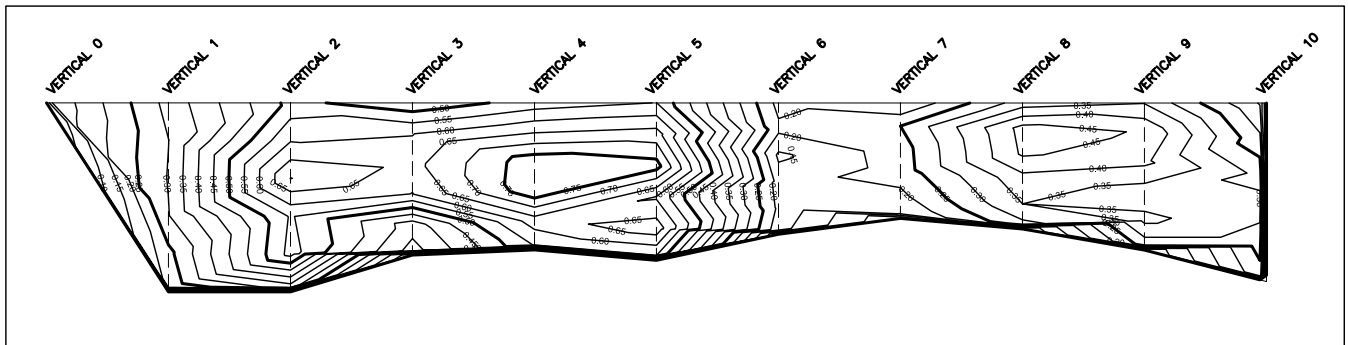
Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 102. Isotacas para sección AA.1



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Figura 103. Isotacas para sección AA.2



Fuente: elaboración propia por medio de datos de campo.

Tabla 246. Inyección constante 1.

C ₀ = 0.17 mg/l			L _{mezcla} = 29 m		
C ₁ = 62.50 mg/l					
Q _{tr} = 0.00088 m ³ /s					
t	C ₀	C ₂	t	C ₀	C ₂
0	0.17	0.17	315	0.17	0.20
15	0.17	0.17	330	0.17	0.20
30	0.17	0.19	345	0.17	0.20
45	0.17	0.20	360	0.17	0.20
60	0.17	0.20	375	0.17	0.19
75	0.17	0.20	390	0.17	0.19
90	0.17	0.20	405	0.17	0.18
105	0.17	0.20	420	0.17	0.18
120	0.17	0.20	435	0.17	0.17
135	0.17	0.21	450	0.17	0.17
150	0.17	0.21	465	0.17	0.17
165	0.17	0.21	480	0.17	0.17
180	0.17	0.21	495	0.17	0.17
195	0.17	0.21	510	0.17	0.17
210	0.17	0.21	525	0.17	0.17
225	0.17	0.21	540	0.17	0.17
240	0.17	0.21	555	0.17	0.17
255	0.17	0.20	570	0.17	0.17
270	0.17	0.20	585	0.17	0.17
285	0.17	0.21	600	0.17	0.17
300	0.17	0.21	615	0.17	0.17
C _{2(prom)} = 0.2028 mg/l					
Q _{total} = 1.6714 m ³ /s					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 247. Inyección constante 2.

C ₀ = 0.17 mg/l			L _{mezcla} = 50 m		
C ₁ = 72.51 mg/l					
Q _{tr} = 0.000312 m ³ /s					
t	C ₀	C ₂	t	C ₀	C ₂
0	0.17	0.17	420	0.17	0.20
20	0.17	0.17	440	0.17	0.19
40	0.17	0.17	460	0.17	0.19
60	0.17	0.17	480	0.17	0.19
80	0.17	0.17	500	0.17	0.19
100	0.17	0.17	520	0.17	0.19
120	0.17	0.18	540	0.17	0.20
140	0.17	0.19	560	0.17	0.20
160	0.17	0.19	580	0.17	0.19
180	0.17	0.19	600	0.17	0.19
200	0.17	0.19	620	0.17	0.19
220	0.17	0.19	640	0.17	0.19
240	0.17	0.19	660	0.17	0.20
260	0.17	0.19	680	0.17	0.20
280	0.17	0.19	700	0.17	0.20
300	0.17	0.19	720	0.17	0.19
320	0.17	0.19	740	0.17	0.19
340	0.17	0.19	760	0.17	0.19
360	0.17	0.19	780	0.17	0.19
380	0.17	0.19	800	0.17	0.19
400	0.17	0.19	820	0.17	0.19
C _{2(prom)} = 0.1917 mg/l					
Q _{total} = 1.0397 m ³ /s					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 248. Inyección constante 3.

C ₀ = 0.17 mg/l			L _{mezcla} = 50 m		
C ₁ = 139.70 mg/l					
Q _{tr} = 0.000312 m ³ /s					
t	C ₀	C ₂	t	C ₀	C ₂
0	0.17	0.17	210	0.17	0.18
10	0.17	0.17	220	0.17	0.18
20	0.17	0.17	230	0.17	0.17
30	0.17	0.17	240	0.17	0.17
40	0.17	0.17	250	0.17	0.17
50	0.17	0.17	260	0.17	0.17
60	0.17	0.17	270	0.17	0.17
70	0.17	0.17	280	0.17	0.17
80	0.17	0.17	290	0.17	0.17
90	0.17	0.18	300	0.17	0.17
100	0.17	0.20	310	0.17	0.17
110	0.17	0.21	320	0.17	0.17
120	0.17	0.21			
130	0.17	0.21			
140	0.17	0.21			
150	0.17	0.21			
160	0.17	0.20			
170	0.17	0.20			
180	0.17	0.20			
190	0.17	0.20			
200	0.17	0.18			
C _{2(prom)} = 0.2050 mg/l					
Q _{total} = 1.2435 m ³ /s					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 249. Inyección constante 4.

C ₀ = 0.17 mg/l			L _{mezcla} = 50 m		
C ₁ = 148.92 mg/l					
Q _{tr} = 0.0030 m ³ /s					
t	C ₀	C ₂	t	C ₀	C ₂
0	0.17	0.17	220	0.17	0.21
10	0.17	0.17	230	0.17	0.20
20	0.17	0.17	240	0.17	0.19
30	0.17	0.17	250	0.17	0.19
40	0.17	0.17	260	0.17	0.18
50	0.17	0.17	270	0.17	0.18
60	0.17	0.17	280	0.17	0.18
70	0.17	0.17	290	0.17	0.18
80	0.17	0.18	300	0.17	0.17
90	0.17	0.24	310	0.17	0.17
100	0.17	0.30	320	0.17	0.17
110	0.17	0.39	330	0.17	0.17
120	0.17	0.40	340	0.17	0.17
130	0.17	0.42	350	0.17	0.17
140	0.17	0.42	360	0.17	0.17
150	0.17	0.41	370	0.17	0.17
160	0.17	0.41	380	0.17	0.17
170	0.17	0.40	390	0.17	0.17
180	0.17	0.31	400	0.17	0.17
190	0.17	0.28			
200	0.17	0.25			
210	0.17	0.23			

C_{2(prom)} = 0.4071 mg/l

Q_{total} = 1.8788 m³/s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 250. Inyección constante 5.

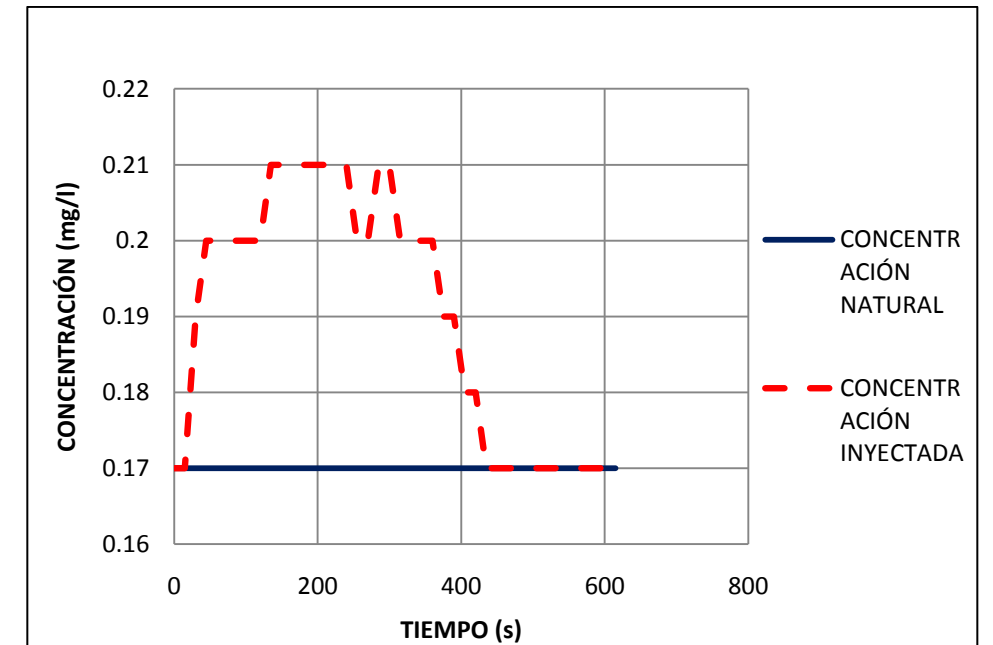
C ₀ = 0.17 mg/l			L _{mezcla} = 50 m		
C ₁ = 144.83 mg/l					
Q _{tr} = 0.0030 m ³ /s					
t	C ₀	C ₂	t	C ₀	C ₂
0	0.17	0.17	220	0.17	0.24
10	0.17	0.17	230	0.17	0.23
20	0.17	0.17	240	0.17	0.22
30	0.17	0.17	250	0.17	0.21
40	0.17	0.17	260	0.17	0.20
50	0.17	0.17	270	0.17	0.19
60	0.17	0.17	280	0.17	0.19
70	0.17	0.18	290	0.17	0.18
80	0.17	0.20	300	0.17	0.18
90	0.17	0.28	310	0.17	0.18
100	0.17	0.38	320	0.17	0.18
110	0.17	0.45	330	0.17	0.17
120	0.17	0.48	340	0.17	0.17
130	0.17	0.48	350	0.17	0.17
140	0.17	0.48	360	0.17	0.17
150	0.17	0.46	370	0.17	0.17
160	0.17	0.45	380	0.17	0.17
170	0.17	0.36	390	0.17	0.17
180	0.17	0.31	400	0.17	0.17
190	0.17	0.28	410	0.17	0.17
200	0.17	0.26	420	0.17	0.17
210	0.17	0.26	430	0.17	0.17

C_{2(prom)} = 0.4667 mg/l

Q_{total} = 1.4599 m³/s

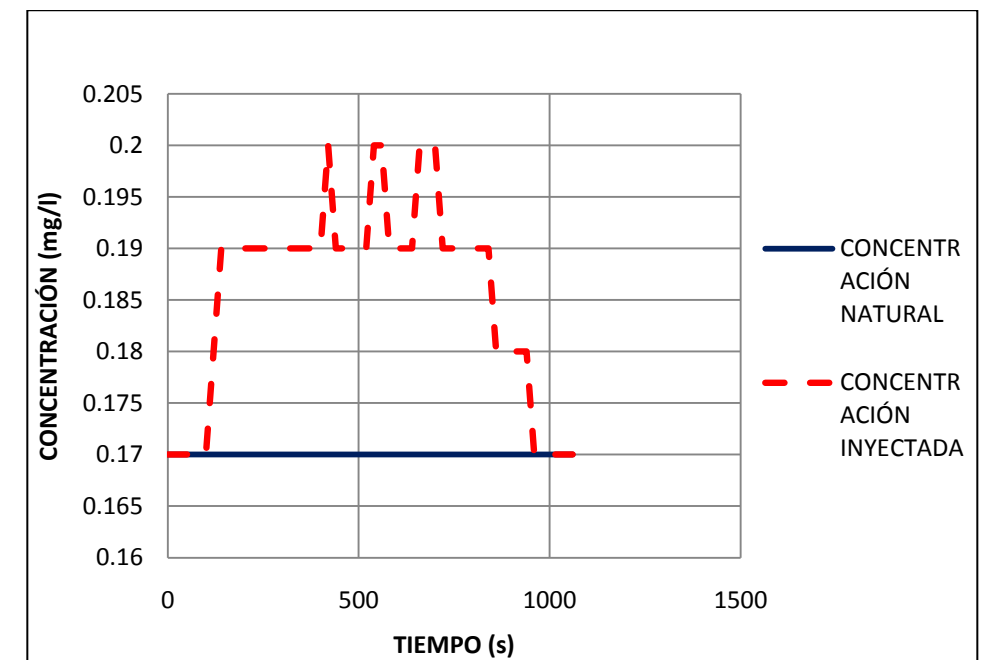
Fuente: elaboración propia.

Figura 104. Inyección constante 1.



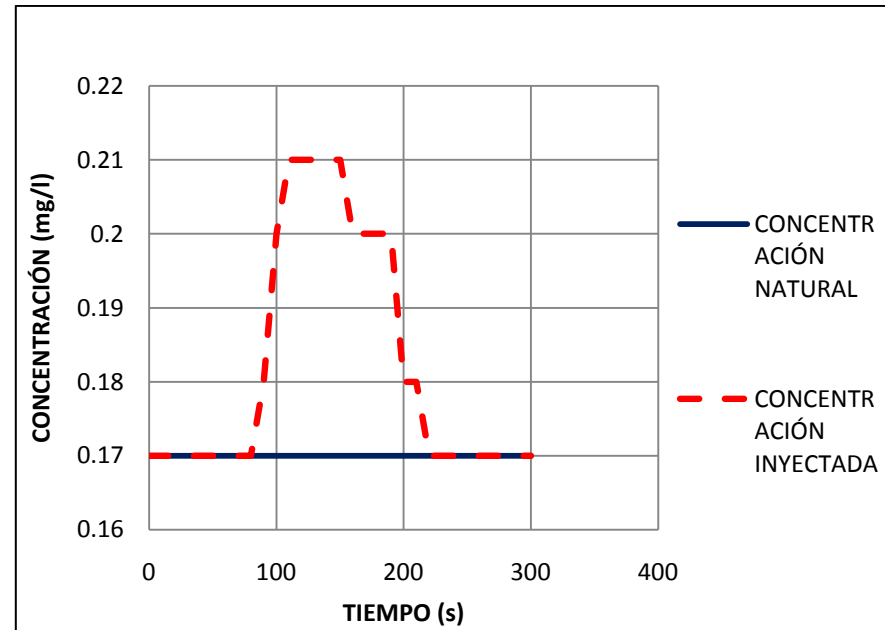
Fuente: elaboración propia.

Figura 105. Inyección constante 2.



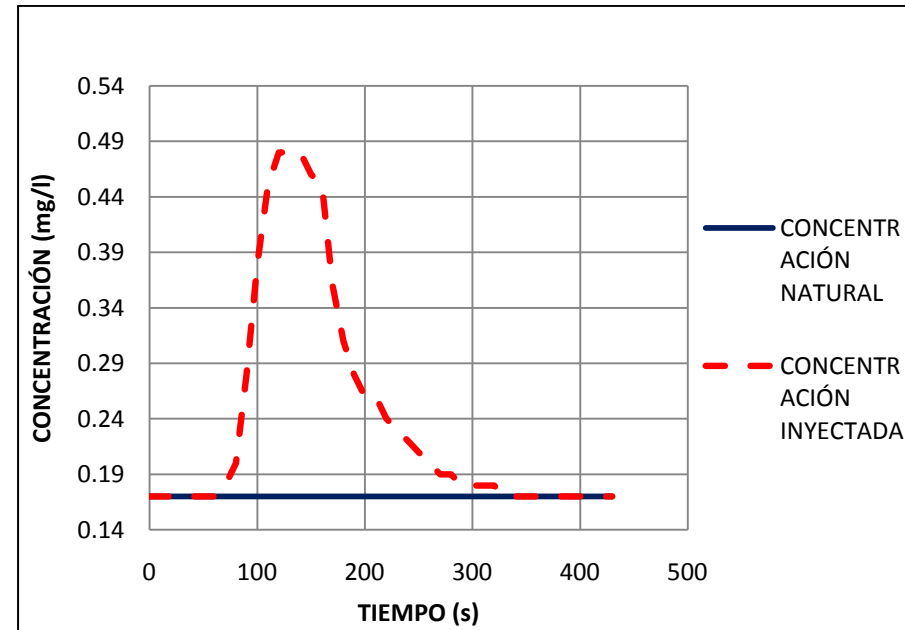
Fuente: elaboración propia.

Figura 106. Inyección constante 3.



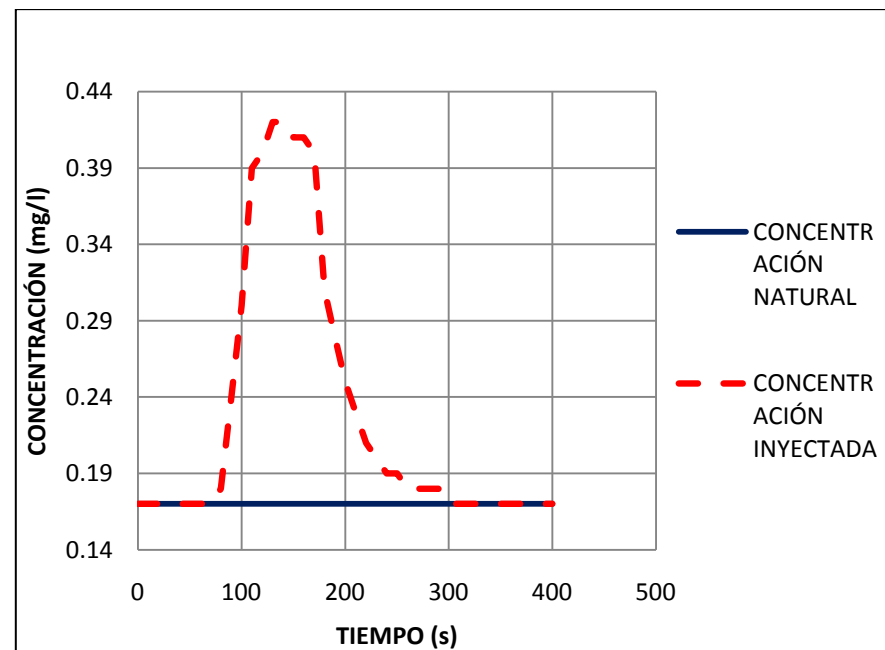
Fuente: elaboración propia.

Figura 108. Inyección constante 5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 106. Inyección constante 4.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 251. Inyección puntual 1.

$C_0 = 0.17 \text{ mg/l}$					
$C_1 = 55.00 \text{ mg/l}$					
$V = 0.16 \text{ m}^3$			$L_{\text{mezcla}} = 29 \text{ m}$		
t	C_0	C_2	t	C_0	C_2
0	0.17	0.17	66	0.17	0.19
3	0.17	0.17	69	0.17	0.19
6	0.17	0.18	72	0.17	0.18
9	0.17	0.19	75	0.17	0.18
12	0.17	0.20	78	0.17	0.18
15	0.17	0.29	81	0.17	0.18
18	0.17	0.68	84	0.17	0.17
21	0.17	0.51	87	0.17	0.17
24	0.17	0.48	90	0.17	0.17
27	0.17	0.35			
30	0.17	0.33			
33	0.17	0.31			
36	0.17	0.30			
39	0.17	0.27			
42	0.17	0.25			
45	0.17	0.24			
48	0.17	0.24			
51	0.17	0.22			
54	0.17	0.21			
57	0.17	0.21			
60	0.17	0.20			
63	0.17	0.20			
$C_3 = 7.78 \text{ mg/l/s}$					
$Q_{\text{total}} = 1.1276 \text{ m}^3/\text{s}$					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 252. Inyección puntual 2.

$C_0 = 0.17$ mg/l					
$C_1 = 45.02$ mg/l					
$V = 0.16$ m ³			$L_{mezcla} = 50$ m		
t	C_0	C_2	t	C_0	C_2
0	0.17	0.17	330	0.17	0.17
15	0.17	0.17	345	0.17	0.17
30	0.17	0.17			
45	0.17	0.17			
60	0.17	0.17			
75	0.17	0.18			
90	0.17	0.19			
105	0.17	0.20			
120	0.17	0.22			
135	0.17	0.24			
150	0.17	0.25			
165	0.17	0.27			
180	0.17	0.26			
195	0.17	0.23			
210	0.17	0.21			
225	0.17	0.20			
240	0.17	0.18			
255	0.17	0.18			
270	0.17	0.17			
285	0.17	0.17			
300	0.17	0.17			
315	0.17	0.17			
$C_3 = 9.00$ mg/l/s					
$Q_{total} = 0.7973$ m ³ /s					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 253. Inyección puntual 3.

$C_0 = 0.17$ mg/l					
$C_1 = 76.93$ mg/l					
$V = 0.244$ m ³			$L_{mezcla} = 50$ m		
t	C_0	C_2	t	C_0	C_2
0	0.17	0.17	220	0.17	0.17
10	0.17	0.17	230	0.17	0.17
20	0.17	0.17	240	0.17	0.17
30	0.17	0.17	250	0.17	0.17
40	0.17	0.17	260	0.17	0.17
50	0.17	0.17			
60	0.17	0.18			
70	0.17	0.21			
80	0.17	0.27			
90	0.17	0.29			
100	0.17	0.27			
110	0.17	0.23			
120	0.17	0.21			
130	0.17	0.20			
140	0.17	0.19			
150	0.17	0.18			
160	0.17	0.18			
170	0.17	0.17			
180	0.17	0.17			
190	0.17	0.17			
200	0.17	0.17			
210	0.17	0.17			
$C_3 = 5.40$ mg/l/s					
$Q_{total} = 3.4684$ m ³ /s					

Fuente: elaboración propia.

Tabla 254. Inyección puntual 4.

$C_0 = 0.17$ mg/l					
$C_1 = 113.64$ mg/l					
$V = 0.244$ m ³			$L_{mezcla} = 50$ m		
t	C_0	C_2	t	C_0	C_2
0	0.17	0.17	220	0.17	0.17
10	0.17	0.17	230	0.17	0.17
20	0.17	0.17	240	0.17	0.17
30	0.17	0.17	250	0.17	0.17
40	0.17	0.17	260	0.17	0.17
50	0.17	0.17	270	0.17	0.17
60	0.17	0.17	280	0.17	0.17
70	0.17	0.17	290	0.17	0.17
80	0.17	0.19	300	0.17	0.17
90	0.17	0.26	310	0.17	0.17
100	0.17	0.30			
110	0.17	0.33			
120	0.17	0.29			
130	0.17	0.25			
140	0.17	0.23			
150	0.17	0.22			
160	0.17	0.19			
170	0.17	0.18			
180	0.17	0.18			
190	0.17	0.17			
200	0.17	0.17			
210	0.17	0.17			
$C_3 = 7.50$ mg/l/s					
$Q_{total} = 3.6916$ m ³ /s					

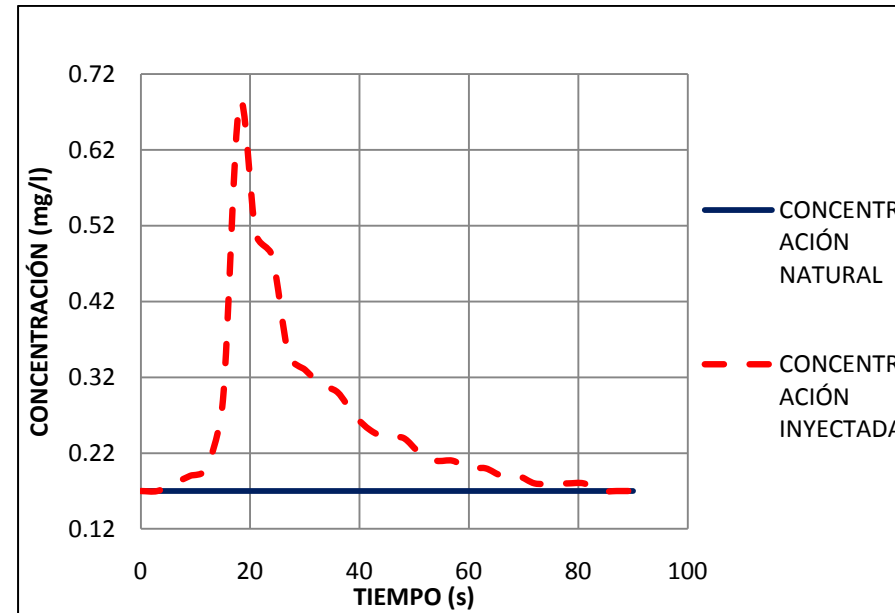
Fuente: elaboración propia.

Tabla 255. Inyección puntual 5.

$C_0 = 0.17 \text{ mg/l}$					
$C_1 = 133.00 \text{ mg/l}$					
$V = 0.244 \text{ m}^3$		$L_{\text{mezcla}} = 50 \text{ m}$			
t	C_0	C_2	t	C_0	C_2
0	0.17	0.17	220	0.17	0.20
10	0.17	0.17	230	0.17	0.19
20	0.17	0.17	240	0.17	0.19
30	0.17	0.17	250	0.17	0.18
40	0.17	0.17	260	0.17	0.18
50	0.17	0.17	270	0.17	0.18
60	0.17	0.17	280	0.17	0.17
70	0.17	0.17	290	0.17	0.17
80	0.17	0.26	300	0.17	0.17
90	0.17	0.38	310	0.17	0.17
100	0.17	0.50	320	0.17	0.17
110	0.17	0.57	330	0.17	0.17
120	0.17	0.54	340	0.17	0.17
130	0.17	0.49	350	0.17	0.17
140	0.17	0.46	360	0.17	0.17
150	0.17	0.41	370	0.17	0.17
160	0.17	0.33	380	0.17	0.17
170	0.17	0.30	390	0.17	0.17
180	0.17	0.26	400	0.17	0.17
190	0.17	0.24	410	0.17	0.17
200	0.17	0.22	420	0.17	0.17
210	0.17	0.21			
$C_3 = 28.90 \text{ mg/l/s}$					
$Q_{\text{total}} = 1.1215 \text{ m}^3/\text{s}$					

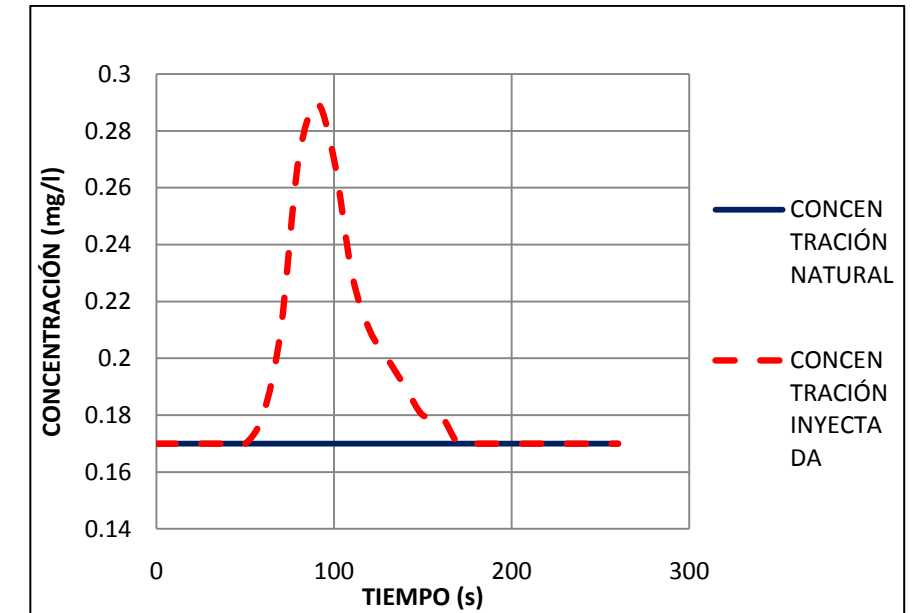
Fuente: elaboración propia.

Figura 109. Inyección puntual 1.



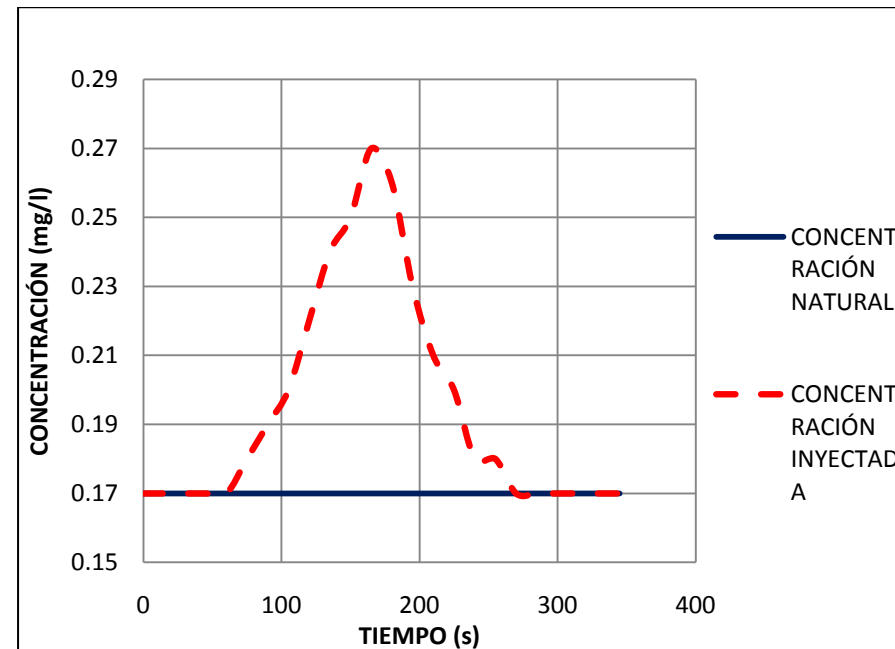
Fuente: elaboración propia.

Figura 111. Inyección puntual 3.



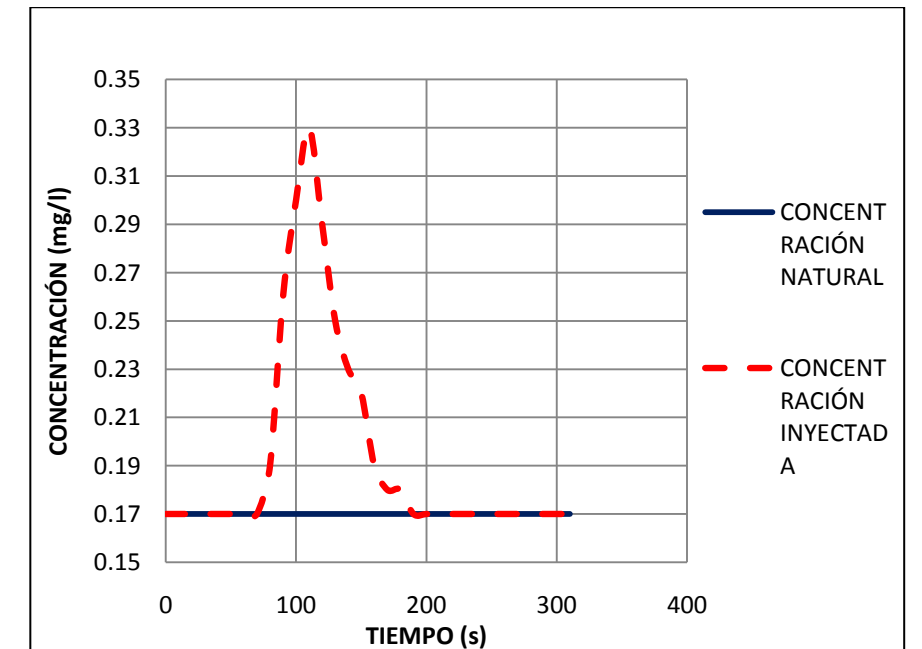
Fuente: elaboración propia.

Figura 110. Inyección puntual 2.



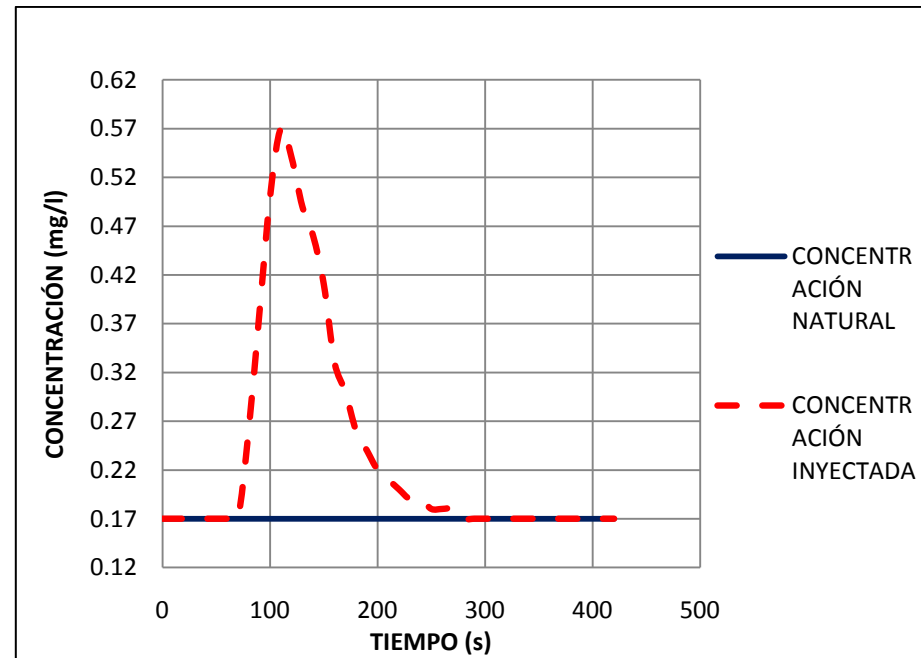
Fuente: elaboración propia.

Figura 112. Inyección puntual 4.



Fuente: elaboración propia.

Figura 113. Inyección puntual 5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 114. Vista de la sección AA.



Figura 115. Vista de la sección AR1.



Figura 116. Vista de la sección AR2.



Figura 117. Molinete utilizado.



Figura 118. Sitio de inyección de trazador.



Este documento ha sido realizado e impreso gracias al apoyo de la Unión Europea a través del Programa Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental -PREVDA- ALA/2005/017-550