

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL AFORADOR PARSHALL COMO UNIDAD DE
MEZCLA RÁPIDA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL
(maldas@yahoo.com)**

**DIRECTOR: PROF. ING. MARCELO MUÑOZ R. M.Sc.
(marcelo.munoz@epn.edu.ec)**

Quito, febrero de 2011

DECLARACIÓN

Yo, María Belén Aldás Sandoval, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Belén Aldás Sandoval, bajo mi supervisión.

PROF. ING. MARCELO MUÑOZ R. M.Sc.

AGRADECIMIENTOS

✂ A Dios, por permitirme alcanzar otra meta y por guiar cada uno de mis pasos.

✂ A mis padres, Mario y Concepción, por haber hecho de mí todo lo que soy, por su sacrificio, apoyo y amor incondicional, por enseñarme a luchar por lo que creo correcto siendo fiel a mis principios

✂ A mi esposo, Edgar, por estar SIEMPRE CONMIGO, amarme y cuidarme a cada momento, por construir nuestro camino cada día, juntos.

✂ A mis hijos, Edgar Martín y María Paula, por existir... por llenar mi vida con su inocencia y por ser esos pequeños motivos que me impulsan a seguir día a día.

✂ Al Ing. Marcelo Muñoz, por su amistad, su paciencia y los valiosos consejos brindados durante todo este tiempo.

✂ Al Ing. Milton Silva y al Dr. Marco Castro, por su colaboración acertada y ayuda en la realización de este proyecto.

✂ A mis amigos, Vladimir y Paúl, que siempre están en el momento oportuno, con las palabras precisas.

✂ Al personal del Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas por su constante ayuda en esta investigación.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar la eficiencia del aforador Parshall como unidad de mezcla rápida, mediante el uso de una solución de un trazador, cloruro de sodio, que se inyectó en el agua circulante con una dosis y caudal conocidos, utilizando para esto el modelo construido en el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Escuela Politécnica Nacional.

En primer lugar se evaluaron los parámetros hidráulicos de interés para la investigación, como son: calados del agua en el aforador, velocidad del agua en la garganta, tiempos de retención, pérdida de carga, gradientes hidráulicos y números de Froude, para tres caudales de trabajo.

Posteriormente se evaluó la concentración de cloruro de sodio en el agua circulante antes y después de la inyección de la solución, en varios puntos de la sección transversal del flujo, mediante mediciones de la conductividad eléctrica de muestras tomadas del agua circulante. Las tomas de muestras se realizaron en dos secciones del aforador, al igual que la inyección de la solución de cloruro de sodio. Además, se ensayaron diferentes métodos de inyección: sobre la superficie del líquido, en el fondo del canal en contracorriente y en el fondo hacia arriba.

Al final de esta investigación, pudo determinarse que pese a que la mayoría de los parámetros hidráulicos del funcionamiento del aforador Parshall se

encuentran dentro de los rangos recomendados para su utilización, en la práctica el mismo no logra una buena mezcla rápida del trazador con toda la masa de agua, lo que se evidencia en la diferencia de concentraciones obtenida en los ensayos. Se observa que se obtiene una distribución del trazador con mejores características cuando se trabaja con el caudal máximo y cuando la inyección se realiza en la garganta del aforador, en el fondo del canal en contracorriente, aunque no son resultados ideales.

Finalmente, no se considera adecuado el uso del aforador Parshall como mezclador rápido, puesto que su uso implicaría un consumo mayor de coagulantes para la consecución de su objetivo.

PRESENTACIÓN

El agua en la naturaleza, siempre se encuentra conteniendo materiales que le confieren características de turbiedad y color, que ya sea por cuestiones de salud pública, del funcionamiento de equipos industriales o domésticos o simplemente estéticas, deben ser eliminadas, considerando que todo esto incide en el aspecto económico.

Los procesos de purificación del agua, por lo general comprenden diversas fases que son principalmente: la precloración, coagulación - floculación, sedimentación, filtración y desinfección. La eliminación de la turbiedad y el color del agua se realiza mediante la operación unitaria de coagulación – floculación, parte fundamental cuyo desempeño marca la consecución de un tratamiento exitoso.

Parte del proceso de coagulación, es la mezcla rápida, tema de esta investigación, que son las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención a que debe someterse la masa de agua en el momento en que se dosifican las sustancias coagulantes, encargadas de desestabilizar y agrupar las partículas suspendidas en el agua para permitir su posterior remoción en forma de agregados mayores o flóculos, proceso que, para ser óptimo, requiere llevarse a cabo en tiempos muy cortos, del orden de fracciones de segundo, evitando así consumos excesivos de sustancias coagulantes.³

La presente investigación tiene como objetivo general evaluar la eficiencia del aforador Parshall como unidad de mezcla rápida en los sistemas de potabilización del agua. Los objetivos específicos planteados son:

- Evaluar los parámetros hidráulicos relevantes: velocidad del flujo, gradientes de velocidad, número de Froude, pérdida de carga y tiempos de retención.
- Relacionar los parámetros hidráulicos con el grado de mezcla obtenido.

En este trabajo se presenta en primer lugar una revisión bibliográfica de los conceptos y principios básicos del flujo en canales abiertos y de la cinética de la coagulación.

A continuación se realiza una descripción del modelo, los materiales y equipos utilizados y del procedimiento experimental llevado a cabo.

Luego se presentan los resultados obtenidos y su análisis.

Finalmente se muestran las conclusiones a las que se llegó al final de la investigación y las recomendaciones.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
PRESENTACIÓN.....	VII
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 CINÉTICA DE LA COAGULACIÓN.....	1
1.1.1 GENERALIDADES.....	2
1.1.2 SUSTANCIAS COAGULANTES.....	11
1.1.3 MECANISMOS DE COAGULACIÓN.....	16
1.1.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.....	19
1.1.5 DISPOSITIVOS USADOS PARA MEZCLA RÁPIDA.....	21
1.1.5.1 DISPOSITIVOS MECÁNICOS.....	22
1.1.5.2 DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS.....	23
1.1.6 POTENCIA CONSUMIDA Y GRADIENTES DE VELOCIDAD.....	26
1.2 PRINCIPIOS HIDRÁULICOS DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....	29
1.2.1 ENERGÍA ESPECÍFICA.....	29
1.2.2 FLUJO CRÍTICO, SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO.....	31
1.2.3 CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	35
1.2.4 RESALTO HIDRÁULICO.....	37
1.2.4.1 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO.....	38
1.2.4.2 CÁLCULO DE LAS PROFUNDIDADES ALTERNAS.....	39
1.2.4.3 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA.....	40
1.2.4.4 CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL RESALTO.....	40
1.3 AFORADOR PARSHALL.....	41
1.3.1 DESCRIPCIÓN.....	42
1.3.2 CRITERIOS DE UTILIZACIÓN.....	44

CAPÍTULO II: PARTE EXPERIMENTAL.....	45
2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	45
2.2 ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA.....	49
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
3.1 PERFILES HIDRÁULICOS EN EL AFORADOR PARSHALL.....	57
3.2 VELOCIDAD DEL AGUA EN LA GARGANTA DEL AFORADOR PARSHALL.....	60
3.3 TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA.....	60
3.4 PÉRDIDA DE CARGA	61
3.5 GRADIENTES DE VELOCIDAD.....	62
3.6 NÚMERO DE FROUDE	63
3.7 TIEMPOS DE RETENCIÓN DEL CLORURO DE SODIO EN LOS DIFERENTES ENSAYOS.....	63
3.8 ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA.....	64
3.9 RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA.	102
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
4.1 CONCLUSIONES.....	105
4.2 RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 DIMENSIONES DE LOS AFORADORES PARSHALL.....	43
TABLA 3.1 CALADOS EN EL AFORADOR PARSHALL.....	58
TABLA 3.2 VELOCIDAD DEL AGUA.....	60
TABLA 3.3 TIEMPOS DE RETENCIÓN.....	61
TABLA 3.4 PÉRDIDA DE CARGA.....	61
TABLA 3.5 GRADIENTES DE VELOCIDAD.....	62
TABLA 3.6 NÚMERO DE FROUDE.....	63
TABLA 3.7 TIEMPOS DE RETENCIÓN DEL CLORURO DE SODIO.....	64
TABLA 3.8 CONCENTRACIONES INICIALES Y MEDIAS PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS.....	65
TABLA 3.9 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1.....	67
TABLA 3.10 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1.....	68
TABLA 3.11 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1.....	69
TABLA 3.12 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2.....	71
TABLA 3.13 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2.....	72
TABLA 3.14 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS EN EL AGUA.....	2
FIGURA 1.2 MODELO DE LA DOBLE CAPA.....	5
FIGURA 1.3 CONCENTRACIÓN DE IONES POSITIVOS Y NEGATIVOS EN RELACIÓN A LA DISTANCIA DEL COLOIDE.....	6
FIGURA 1.4 POTENCIAL VS. DISTANCIA DEL COLOIDE.....	6
FIGURA 1.5 CURVA DE ENERGÍA NETA DE INTERACCIÓN.....	8
FIGURA 1.6 PRODUCTOS DE HIDRÓLISIS DEL ION DE ALUMINIO CON EL AGUA Y LA ALCALINIDAD.....	16
FIGURA 1.7 MEZCLADOR MECÁNICO EN LÍNEA.....	22
FIGURA 1.8 RETROMEZCLADORES.....	23
FIGURA 1.9 DIFUSORES.....	24
FIGURA 1.10 INYECTORES.....	24
FIGURA 1.11 MEZCLADOR ESTÁTICO.....	25
FIGURA 1.12 RESALTO HIDRÁULICO.....	25
FIGURA 1.13 VERTEDERO RECTANGULAR.....	26
FIGURA 1.14 ELEMENTO DE FLUIDO SUJETO A MEZCLA HIDRÁULICA O MECÁNICA.....	27
FIGURA 1.15 COMPONENTES DE LA ENERGÍA.....	30
FIGURA 1.16 VARIACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA CON LA PROFUNDIDAD.....	32
FIGURA 1.17 PROFUNDIDAD CRÍTICA Y PROFUNDIDADES ALTERNAS.....	33
FIGURA 1.18 ESQUEMA PARA LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	35
FIGURA 1.19 ENERGÍA Y PROFUNDIDADES DE UN RESALTO HIDRÁULICO.....	37
FIGURA 1.20 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO.....	39
FIGURA 1.21 GRÁFICA PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO.....	41
FIGURA 1.22 GEOMETRÍA DEL AFORADOR PARSHALL.....	42

FIGURA 1.23 PROFUNDIDADES DE IMPORTANCIA EN EL AFORADOR PARSHALL.....	44
FIGURA 2.1 BOMBAS DEL LABORATORIO DE INVESTIGACIONES HIDRÁULICAS.....	46
FIGURA 2.2 TANQUE ELEVADO.....	46
FIGURA 2.3 TANQUES DE CARGA.....	47
FIGURA 2.4 VERTEDERO TRIANGULAR 60°.....	47
FIGURA 2.5 CANAL DE ENTRADA.....	48
FIGURA 2.6 AFORADOR PARSHALL Y TANQUE DE DESCARGA.....	49
FIGURA 2.7 AFORADOR PALMER BOWLUS Y TUBERÍA DE DESCARGA.....	49
FIGURA 2.8 MEDIDOR MULTIPARÁMETRO OAKLON PC 510.....	51
FIGURA 2.9 BOMBA PERISTÁLTICA COLE PALMER MASTER FLEX.....	51
FIGURA 2.10 ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE INYECCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO.....	52
FIGURA 2.11 MANGUERAS DE INYECCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO.....	53
FIGURA 2.12 MALLAS Y MANGUERAS PARA LA TOMA DE MUESTRAS.....	53
FIGURA 2.13 ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DE LAS MALLAS PARA LA TOMA DE MUESTRAS.....	54
FIGURA 2.14 SUJECCIÓN DE LAS MANGUERAS EN LAS MALLAS.....	54
FIGURA 2.15 RECIPIENTES PLÁSTICOS Y MANGUERAS PARA LA TOMA DE MUESTRAS.....	55
FIGURA 2.16 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS TOMADAS.....	55
FIGURA 2.17 ESQUEMA DEL MODELO DEL AFORADOR PARSHALL.....	56
FIGURA 3.1 AFORADOR PARSHALL EN FUNCIONAMIENTO.....	57
FIGURA 3.2 CALADOS DEL AGUA PARA LOS DIFERENTES CAUDALES.....	59
FIGURA 3.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS EN LAS MALLAS.....	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO.....	77
GRÁFICO 3.2 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO.....	78
GRÁFICO 3.3 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO.....	78
GRÁFICO 3.4 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO.....	79
GRÁFICO 3.5 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO.....	79
GRÁFICO 3.6 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO.....	80
GRÁFICO 3.7 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE.....	82
GRÁFICO 3.8 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE.....	82
GRÁFICO 3.9 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE.....	83
GRÁFICO 3.10 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B	

FONDO CONTRACORRIENTE.....	83
GRÁFICO 3.11 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE.....	84
GRÁFICO 3.12 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE.....	84
GRÁFICO 3.13 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA.....	86
GRÁFICO 3.14 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA.....	87
GRÁFICO 3.15 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₂ = 30,17 L/S Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA.....	87
GRÁFICO 3.16 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₂ = 30,17 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA.....	88
GRÁFICO 3.17 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA.....	88
GRÁFICO 3.18 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA.....	89
GRÁFICO 3.19 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO.....	91
GRÁFICO 3.20 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO.....	91
GRÁFICO 3.21 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₂ = 30,17 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A	

SOBRE EL FLUJO.....	92
GRÁFICO 3.22 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₂ = 30,17 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO.....	92
GRÁFICO 3.23 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO.....	93
GRÁFICO 3.24 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO.....	93
GRÁFICO 3.25 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE.....	95
GRÁFICO 3.26 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE.....	95
GRÁFICO 3.27 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₂ = 30,17 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE.....	96
GRÁFICO 3.28 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₂ = 30,17 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE.....	96
GRÁFICO 3.29 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE.....	97
GRÁFICO 3.30 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₃ = 46,09 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE.....	97
GRÁFICO 3.31 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA.....	99
GRÁFICO 3.32 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q ₁ = 20,67 l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B	

FONDO HACIA ARRIBA.....	99
GRÁFICO 3.33 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA.....	100
GRÁFICO 3.34 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA.....	100
GRÁFICO 3.35 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA.....	101
GRÁFICO 3.36 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA.....	101

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 CINÉTICA DE LA COAGULACIÓN^{3,5,7,9,10,18}

En los procesos de tratamiento de agua se distinguen dos procesos fundamentales: la coagulación, que es la operación unitaria que consiste en desestabilizar las partículas dispersas en el agua mediante varios métodos para lograr su agrupación, mediante la anulación de las fuerzas que las mantienen separadas.

La floculación, por su parte, es la operación unitaria que se encarga de agrupar las partículas desestabilizadas para formar partículas mayores que puedan separarse posteriormente.

Estos procesos se usan principalmente para:⁷

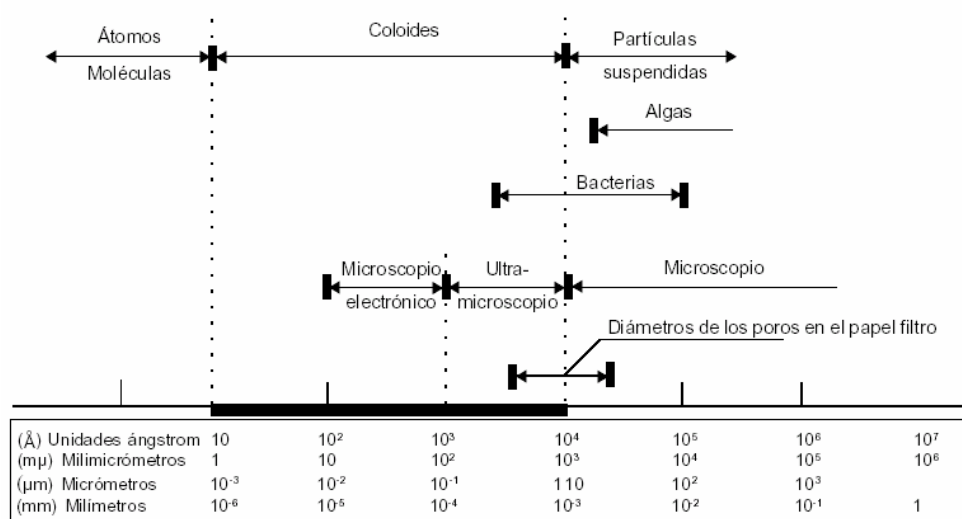
- ⌘ Remoción de turbiedad orgánica e inorgánica no sedimentable en tiempos cortos
- ⌘ Remoción de color verdadero y aparente
- ⌘ Eliminación de patógenos, virus y bacterias
- ⌘ Eliminación de algas

1.1.1 Generalidades

Antes de tratar el tema de la coagulación propiamente dicha, conviene revisar ciertos conceptos básicos relativos al tema, a saber:

Sustancias dispersas en el agua: Según el tamaño de las partículas contenidas en el agua, se dan diferentes fenómenos, cada uno con sus características, así, cuando existe solución verdadera, el soluto tiene dimensiones iguales o menores a $1 \mu\text{m}$; cuando existe un estado coloidal, el coloide tiene dimensiones que varían de $1 \mu\text{m}$ hasta $1000 \mu\text{m}$, y cuando existe suspensión gruesa las partículas suspendidas tienen tamaños iguales o mayores a $1000 \mu\text{m}$. En la Figura 1.1, se puede apreciar la distribución de tamaños de las partículas.

FIGURA 1.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS EN EL AGUA



FUENTE: DE VARGAS (2004)

Los coloides forman una parte importante de la turbiedad y el color del agua, tienen propiedades que los distinguen en forma precisa, tales como:¹⁷

- ⌘ No pueden sedimentarse aún cuando tengan mayor densidad que el agua.
- ⌘ Poseen un movimiento constante y desordenado (movimiento browniano), siendo este fenómeno explicado por la teoría cinética como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido. Al elevarse la temperatura del líquido, las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumenta el movimiento browniano.
- ⌘ Gracias a este movimiento, las partículas coloidales tienden a dispersarse o difundirse por todas partes en el sistema hídrico.
- ⌘ En la práctica, es posible calcular el número de partículas y el peso promedio de ellas en sistemas coloidales mediante la determinación experimental de la presión osmótica, utilizando un osmómetro, aparato en el que se observa el paso del solvente hacia una solución coloidal a través de una membrana semipermeable, se determinan los datos de presión osmótica y concentraciones de las soluciones de trabajo.
- ⌘ En una suspensión coloidal, las partículas dispersan la luz que la atraviesa, y aparece turbia. El efecto Tyndall - Faraday es un fenómeno por el cual ocurre este hecho. Esta dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas. La determinación nefelométrica de la turbiedad utiliza el efecto de Tyndall - Faraday para su medición. Sin embargo, por la naturaleza de la medición, la turbiedad no se relaciona con el número de partículas que la provocan, ni siquiera con su masa total.
- ⌘ Son primariamente incoloros, pero pueden aparecer con cierta coloración, dependiendo de su concentración y de su naturaleza, pueden adquirir coloraciones cafés, rojizas, violáceas o verdosas.

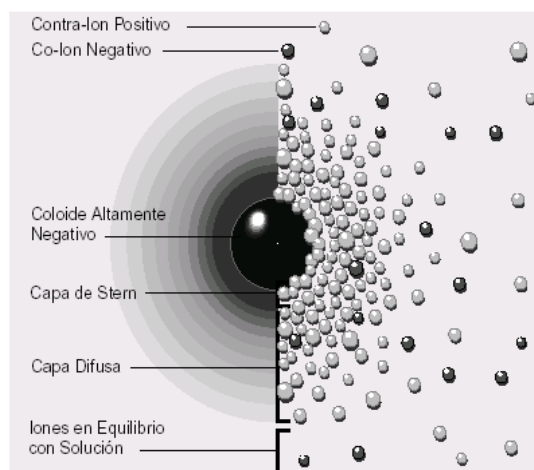
- ⌘ Poseen una enorme superficie específica, del orden de 10^5 a 10^6 m²/g, que proporciona a los coloides una gran capacidad de adsorción y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo.
- ⌘ Poseen cargas electrostáticas: cada coloide tiene una carga eléctrica que por lo general es negativa, cuando el pH del agua está entre 5 y 10, la cual hace que dos coloides vecinos permanezcan separados debido a las fuerzas de repulsión existentes, mismas que mediante el proceso de coagulación y floculación pretenden ser reducidas o eliminadas, para que los coloides se aglomeren y sedimenten posteriormente.⁵

Para explicar este fenómeno, se han planteado tres teorías:^{1,7,18}

- a) La teoría de Helmholtz supone que a la superficie del coloide, se acercan tantos contraiones (iones del signo contrario) del medio dispersante cuantos sean necesarios para neutralizar su carga, formando una capa a su alrededor, en la que cae todo el potencial.
- b) Una segunda teoría, la de Gouy y Chapman, sostiene que la anterior es incorrecta, dado que la agitación térmica del líquido tiende a separar los contraiones de la superficie del coloide formando una capa difusa a su alrededor, en la que el potencial cae lentamente.
- c) Por último, la teoría de Stern propone que es necesario aceptar la coexistencia de las dos teorías antes expuestas, considerando que existe una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide, en las que el potencial cae rápidamente en la capa adherida y lentamente en la difusa.

Es común el recurrir a esta última teoría de “la doble capa” para explicar los fenómenos electrostáticos que afectan a las suspensiones coloidales: la atracción que generan los iones negativos del coloide, hace que algunos iones positivos, los llamados contraiones, se adhieran fuertemente a su superficie, mientras otros iones positivos adicionales sean atraídos todavía pero levemente y rechazados por los contraiones adheridos y por otros iones positivos cercanos al coloide. Este equilibrio dinámico provoca la creación de una capa difusa de contraiones alrededor del coloide, esto puede apreciarse en la Figura 1.2, donde se observa, en el lado izquierdo, el cambio de la densidad de carga alrededor del coloide y en el lado derecho, la distribución de los iones positivos y negativos a su alrededor.

FIGURA 1.2 MODELO DE LA DOBLE CAPA

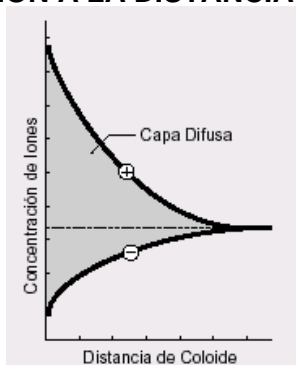


FUENTE: ZETA-METER, INC.

En la capa difusa, existe también un déficit de iones negativos, llamados co-iones, cuya concentración se incrementa al alejarse del coloide. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide, y

gradualmente disminuye hasta cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan, en el seno de la solución, como se ve en la Figura 1.3.

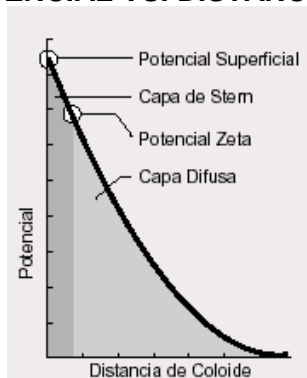
FIGURA 1.3 CONCENTRACIÓN DE IONES POSITIVOS Y NEGATIVOS EN RELACIÓN A LA DISTANCIA DEL COLOIDE



FUENTE: ZETA-METER, INC.

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución, que tiene su valor máximo en la superficie del coloide y disminuye su magnitud con la distancia, hasta hacerse cero fuera de la capa difusa, como se observa en la Figura 1.4.

FIGURA 1.4 POTENCIAL VS. DISTANCIA DEL COLOIDE



FUENTE: ZETA-METER, INC.

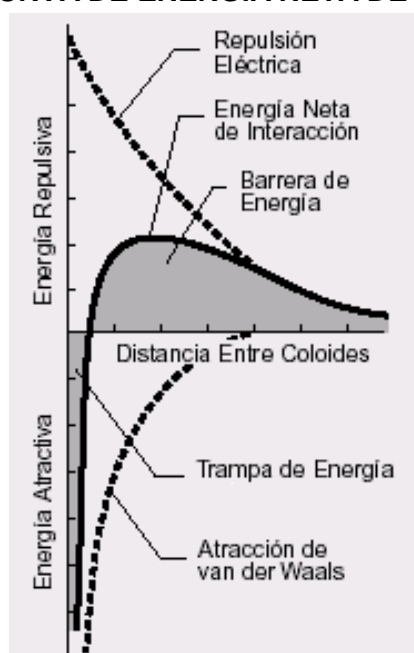
La caída del potencial y la distancia desde el coloide son indicadores importantes de las fuerzas de repulsión existentes entre los coloides. Un punto de particular interés es el potencial existente donde se unen la capa difusa y la adherida, llamado potencial zeta, que es utilizado para controlar el comportamiento de las suspensiones coloidales.

Por su parte, la teoría DLVO (llamada así por Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek) permite explicar cómo se comportan los coloides en suspensión. Esta teoría se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo Van der Waals. La repulsión electrostática se hace importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere de una determinada energía para vencer esta repulsión y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que se tiene que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa. La atracción de Van der Waals entre los coloides es el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo, es decir, una molécula del primer coloide experimenta la atracción de Van der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Se usa una curva de energía de atracción para indicar la variación en las fuerzas de Van der Waals con la distribución entre las partículas. La teoría DLVO explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de Van

der Waals y la curva de repulsión electrostática, a la curva combinada se llama “energía neta de interacción”.

A cada distancia el menor valor se resta del mayor para dar la energía neta. El valor neto se representa entonces arriba si es repulsivo o abajo si es atractivo, y así se forma la curva de la Figura 1.5.

FIGURA 1.5 CURVA DE ENERGÍA NETA DE INTERACCIÓN



FUENTE: ZETA-METER, INC.

La curva de interacción neta cambia siempre de atracción a repulsión y nuevamente a atracción. Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama “barrera de energía”. La altura de esta barrera indica qué tan estable es el sistema. Para aglomerar dos partículas que van a chocar estas deben tener suficiente energía cinética debido a su velocidad y masa para pasar sobre dicha barrera. Si la barrera desaparece, entonces la interacción neta es totalmente atractiva y las partículas se aglomeran. Esta región

interna es referida como la trampa de energía, pues los coloides pueden considerarse como sistemas unidos por las fuerzas de Van der Waals.

Dependiendo del propósito es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el pH o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga del coloide.

Turbiedad: Es la propiedad óptica de una sustancia, líquida o sólida, de diseminar y absorber un haz de luz que pase por ella en todas direcciones, en lugar de transmitirla en línea recta.

En el agua en estado natural, se debe a la presencia de algas, crecimientos bacterianos y principalmente de partículas arcillosas provenientes de la erosión del suelo, que comprenden una gran variedad de compuestos.

La turbiedad debe ser eliminada del agua por cuanto constituye un impedimento para la correcta desinfección del agua, dado que los organismos patógenos, como bacterias y virus pueden escudarse en las partículas suspendidas, además de las implicaciones estéticas que conlleva su presencia.

Existen dos tipos de equipos para medir turbiedad. En la primera clase de equipos están el turbidímetro de aguja de platino y la bujía de Jackson, los cuales son aptos para medir turbiedades altas. En la segunda clase está el turbidímetro Hach, que se utiliza para medir turbiedades bajas (nefelometría).

Color: Se debe a la extracción producida por el agua de sustancias provenientes del suelo, productos de descomposición de las maderas, materia orgánica en

general, metales como el hierro y manganeso, plantas acuáticas, protozoarios, etc., partículas cuyo tamaño puede variar entre 3,5 y 10 μm , lo que se acerca bastante al límite entre dispersión coloidal y solución verdadera y por ello existe discrepancia entre los investigadores. Packham considera que las sustancias húmicas están en verdadera solución pero que una proporción de las moléculas son lo suficientemente grandes como para presentar fenómenos coloidales. Black y Christman en cambio encontraron que la membrana filtrante de 10 μm de abertura de malla retiene solamente el 13% del color original y la de 3.5 μm el 91%. Según ellos, se podría concluir que la mayoría de las partículas tienen tamaños inferiores de 3.5 μm , lo que está muy cerca del límite entre dispersión coloidal y solución verdadera.^{17,18}

Se habla de color aparente del agua si no se ha removido la turbiedad y de color verdadero en caso contrario.

La importancia de la remoción del color en el agua está relacionada con los aspectos de aceptabilidad del consumidor y usuario, sea este doméstico o industrial, lo que incluye los siguientes aspectos: estético, demanda de desinfectantes, requerimientos de proceso, especificaciones de la maquinaria y equipos, y salud pública.

Alcalinidad: Se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Las especies contenidas en el agua, que son causantes de la alcalinidad de la misma son bicarbonatos $(\text{HCO}_3)^{-1}$; carbonatos $(\text{CO}_3)^{-2}$ e hidróxidos $(\text{OH})^{-1}$, principalmente. Es un parámetro de importancia para la coagulación, puesto que

las sustancias coagulantes reaccionan con las especies mencionadas para llevar a cabo su función, como se verá adelante.

1.1.2 Sustancias Coagulantes^{15,18}

Las operaciones de coagulación – floculación constituyen el proceso mediante el cual las partículas se aglutinan formando agregados de peso específico mayor que el agua llamadas “flóculos”, que son capaces de sedimentar, gracias a la acción de las sustancias coagulantes cuya función es la de desestabilizar a las partículas coloidales del agua, promoviendo la aglomeración de las mismas, facilitando su posterior separación por sedimentación. Pueden ser de varios tipos:

- **Los polímeros** tienen un uso bastante generalizado en los países desarrollados. Son sustancias de un alto peso molecular, de origen natural o sintético, que requieren ensayos de coagulación y floculación antes de su elección, los cuales pueden presentar forma sólida (polvo) o líquida. La solubilidad de los polímeros es variable y sus viscosidades elevadas. Si un polímero contiene grupos ionizantes, se lo conoce como polielectrolitos. Los polielectrolitos pueden ser de tres tipos: no iónicos, aniónicos y catiónicos. En el primer grupo está el polivinil alcohol, las policrilamidas y el óxido de polietileno. En el segundo grupo se encuentra el sulfonato de poliestireno, la parcialmente ionizada poliácridamida y el poliácridato. En el tercer grupo se encuentra la polivinil piridina y la polietilén imina. Los polielectrolitos pueden usarse, según el tipo, como coagulantes primarios o como ayudantes de coagulación. Como

coagulantes primarios, la concentración empleada generalmente oscila entre 1 y 5 mg/l, mientras que como ayudantes de coagulación la concentración es menor: entre 0,1 y 2 mg/l.

- **Los coagulantes metálicos**, sales de hierro y aluminio, han sido los más utilizados en la clarificación de aguas. Tienen la ventaja de actuar como coagulantes - floculantes al mismo tiempo. Sin embargo tienen el inconveniente de ser muy sensibles a un cambio de pH, que si no está dentro del intervalo adecuado causa que la clarificación sea pobre y lleguen a solubilizarse iones de hierro y aluminio generando problemas al aparecer en el agua filtrada.

Las sales metálicas más utilizadas son:

⌘ Sulfato Férrico: Se encuentra en forma anhidra $Fe_2(SO_4)_3$ y más comúnmente en forma hidratada $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$. Funciona de forma estable en un intervalo de pH de 3.5 a 11. Produce flóculos grandes y densos que sedimentan rápidamente. Es un polvo blanco verdoso, muy soluble en el agua. Se emplea en tratamiento de agua potable, con la desventaja de que en algún caso puede producir problemas de coloración.

⌘ Cloruro Férrico: Es similar al anterior, trabaja correctamente en el intervalo de pH de 4 a 11. También puede presentar problemas de coloración en las aguas. Se presenta en forma sólida o líquida; esta última es la más utilizada en el tratamiento del agua. La forma sólida es cristalina, de color pardo, de fórmula teórica $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Se disuelve fácilmente en su agua de cristalización, por lo que es necesario protegerlo del calor.

⌘ Sulfato ferroso: Es un polvo de color verde muy soluble. Por su naturaleza ácida, para su almacenamiento y preparación se usa material plástico.

Es la fuente más barata de hierro como coagulante. Se lo encuentra como sal hidratada, $Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$ y se lo llama con el nombre de “coperas”. Su desventaja es que debe ser usado con cal. Trabaja en aguas alcalinas, con pH mayor a 8, no funciona para aguas blandas.

⌘ Policloruro de aluminio: Abreviado generalmente como PAC es el resultado de un proceso de fabricación complejo bajo condiciones de trabajo controladas, es un polímero de hidroxiclorigenito de aluminio con fórmula: $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)} \cdot H_2O$ donde $0 < m < 3n$. Si bien presenta buenas propiedades como coagulante, su desventaja es el elevado costo.

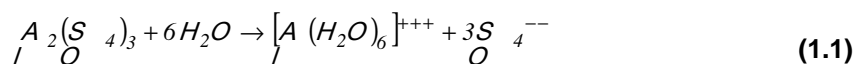
⌘ Aluminato sódico: Es una sal de fórmula $NaAlO_2$, que se emplea poco. Su uso más habitual es eliminar color a pH bajo. Además se puede usar en el ablandamiento de agua con cal.

⌘ Sulfato de Aluminio: Conocido como alumbre, es una sustancia coagulante efectiva en intervalos de pH 6 a 8. Su uso está generalizado en el tratamiento de agua potable y en la reducción de coloides orgánicos y fósforo, debido a su bajo costo y a la facilidad de su manejo.

El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil, el hidróxido de aluminio contenido en la bauxita y de un ácido fuerte, el ácido sulfúrico, por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3,8. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad. Es necesario tener en cuenta esta tendencia ácida para la preparación de las soluciones y los empaques para su distribución, y emplear, por lo general, material plástico. La aplicación del producto es inmediata, realizándose mediante equipos dosificadores desde los tanques de almacenamiento, entrando en

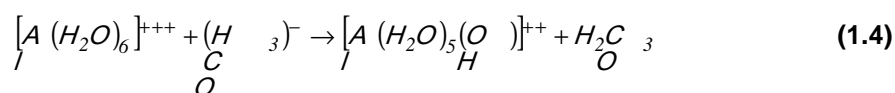
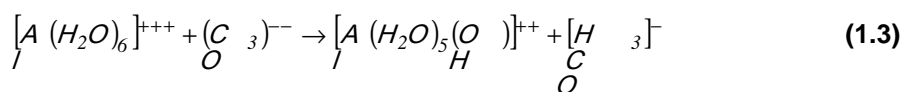
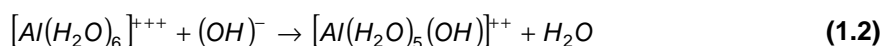
contacto el producto con el agua a tratar, donde mediante procesos de mezcla y reacciones de hidrólisis se consigue precipitar el hidróxido metálico, después de sendos procesos de desestabilización coloidal y de neutralización de cargas eléctricas. Se logra con todo ello eliminar el color, la turbidez, las bacterias, los virus y microorganismos en general.

El sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, si es reactivo de laboratorio o $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ si es comercial, contiene alrededor del 17 % de alúmina y se presenta en forma de cristales de color blanco marfil. Cuando se encuentra en solución, se hidroliza, es decir, se asocia con el agua, de la siguiente manera:

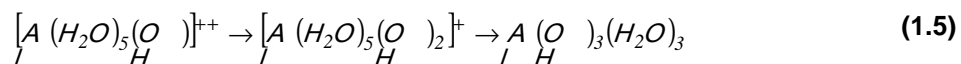


Los iones $[Al(H_2O)_6]^{+++}$ actúan como un ácido y son capaces de reaccionar con las bases que se encuentran en el agua: con la alcalinidad, expresada como $(OH)^-$, $(CO_3)^{--}$, $(HCO_3)^-$; y con las moléculas del agua H_2O .

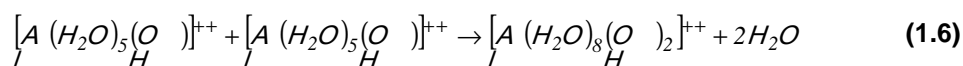
Las reacciones con la alcalinidad, ocurren con más facilidad que las reacciones con el agua, y pueden expresarse así:



El $[Al(H_2O)_5(OH)]^{++}$ es un compuesto inestable y transitorio que se hidroliza rápidamente, reemplazando un (H_2O) por un $(OH)^-$:

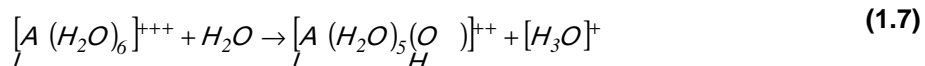


El producto final es un hidróxido de aluminio insoluble que precipita a determinado pH y puede no tener carga o tenerla negativa $Al(OH)_4^-$, según varios autores, las especies monoméricas de un solo átomo de aluminio, se polimerizan reaccionando entre sí:



Estas reacciones de polimerización continúan con el tiempo, formando compuestos tales como: $Al_6(OH)_{15}^{3-}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ y finalmente $Al(OH)_3(H_2O)_3$ o $Al(OH)_4^-$, según el pH.

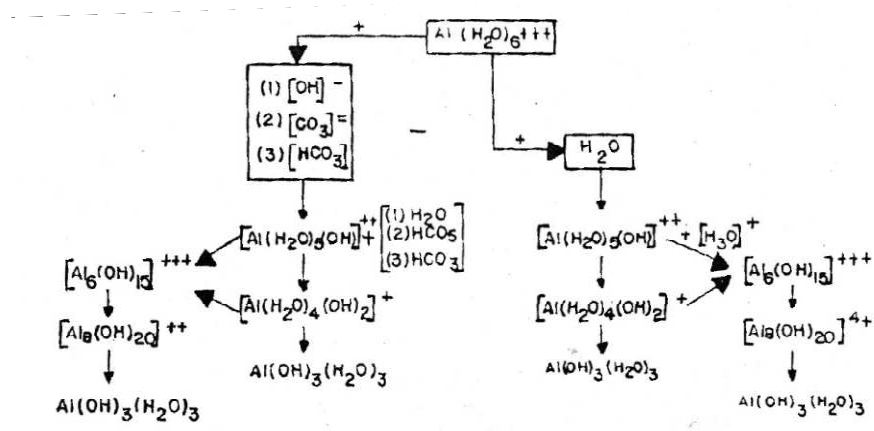
Cuando toda la alcalinidad del agua ha sido consumida, el ion de aluminio hidratado reacciona con las moléculas de agua, así:



Como en el caso anterior, $[Al(H_2O)_5(OH)]^{++}$, se considera un compuesto transitorio, que finalmente vuelve a dar como resultado $Al(OH)_3(H_2O)_3$ o $Al(OH)_4^-$.

Todos estos procesos pueden visualizarse de mejor manera en la Figura 1.6.

FIGURA 1.6 PRODUCTOS DE HIDRÓLISIS DEL ION DE ALUMINIO CON EL AGUA Y LA ALCALINIDAD



FUENTE: ARBOLEDA (1973)

1.1.3 Mecanismos de Coagulación^{1,2}

La coagulación, comienza en el instante en que las sustancias coagulantes son añadidas al agua y éstas reaccionan con la alcalinidad, las partículas del agua y consigo mismas, es decir, se da una desestabilización de las partículas suspendidas.

La coagulación puede darse básicamente por los siguientes procesos:

- Por neutralización de la carga: se da cuando existe una adsorción de iones de carga opuesta a la de los iones determinantes del potencial en la capa de Stern. Los coloides pueden adsorber iones o productos de hidrólisis simples de sales metálicas que se forman al inicio de la coagulación o polímeros formados más tarde al llevarse a cabo las reacciones del coagulante con la alcalinidad y el agua.
- Por compresión de la doble capa: se logra cuando se incrementa la concentración del coagulante y se incorporan contraiones en

la capa difusa, con lo cual ésta se represa disminuyendo la magnitud de las fuerzas de repulsión, eliminando la barrera de energía.

- c) Por puente químico: ocurre cuando la superficie de la partícula adsorbe a los contraiones mediante enlaces de hidrógeno, covalentes o iónicos, quedando los contraiones adheridos a puntos fijos de adsorción, este fenómeno es común cuando se utilizan como coagulantes moléculas poliméricas de alto peso molecular.
- d) Por barrido o incorporación: se da cuando se agrega una cantidad de coagulantes muy elevada, hasta exceder su límite de solubilidad en el agua. Se forma entonces el precipitado de hidróxidos producto de las reacciones con la alcalinidad y el agua, creándose así una masa esponjosa que atrapa a los coloides mientras sedimenta.

En las plantas de tratamiento de agua, el proceso se da en tres pasos:

- a) Adición de los coagulantes.
- b) Dispersión de los coagulantes o mezcla rápida.
- c) Aglutinación de partículas o mezcla lenta, que es ya parte del proceso de floculación.

Es en el primer paso donde los coagulantes son agregados al agua, operación que puede realizarse bien dosificando el coagulante en polvo a un tanque de hidratación y luego inyectando esa solución en el punto de aplicación, o preparando la solución previamente y dosificándola por gravedad o por bombeo.

En el segundo paso, es decir, la mezcla rápida, de cuyas características dependen el resto de operaciones dentro del proceso de clarificación, se dan tres fases diferentes:³

Primera fase: Hidrólisis de los iones metálicos, que se da en un tiempo extremadamente corto, estimado en 10^{-10} y 10^{-3} segundos.

Segunda fase: Difusión de los compuestos formados y adsorción por parte de los coloides, proceso que puede variar entre 8.5×10^{-5} a 2.4×10^{-4} segundos.

Tercera fase: Polimerización o reacción entre los iones hidratados para formar especies poliméricas, que se realiza en un tiempo entre 10^{-2} y 1 segundo.

Es por este motivo que los productos de hidrólisis deben ser transportados hasta la superficie de los coloides en una fracción de segundo, por cuanto dichos productos se forman con distintas velocidades y tienen diferente capacidad de neutralización de las partículas. Los monohidróxidos simples que son los primeros en aparecer, son adsorbidos más rápidamente que los hidróxidos y las cadenas poliméricas que se forman al final de las reacciones. Si dichas reacciones llegan a completarse sin que los productos de hidrólisis iniciales hayan sido adsorbidos, existe un desperdicio innecesario de coagulantes, pues se deberá añadir más de ellos para obtener un buen resultado.

Varios autores afirman que puede obtenerse una velocidad de aglutinación de las partículas 3.5 veces mayor con solo optimizar la mezcla rápida, para lo cual el punto de aplicación de los coagulantes debe ser escogido cuidadosamente y debe ser el sitio donde se produzca la mayor turbulencia en el flujo de agua.³

1.1.4 Factores que influyen en la Coagulación³

Para optimizar el proceso de coagulación es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

⌘ pH: Es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada tipo de agua existe un rango de pH óptimo para el cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta. Todos los productos químicos que alteran el pH (cal, soda, ácido, cloro y otros) deben aplicarse aguas arriba del punto de aplicación del sulfato de aluminio, a una distancia suficiente que asegure una completa disolución y mezcla.

El pH del agua cruda debe corregirse previamente de modo que resulte el pH óptimo de coagulación, antes que la reacción del sulfato de aluminio se produzca.

⌘ Sales disueltas: Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo
- Modificación del tiempo requerido para la floculación
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente

⌘ Temperatura del agua: La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad que afectan a la

energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta.

⌘ Dosis de coagulante: La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, de la siguiente manera:

- Poca cantidad del coagulante no neutraliza totalmente la carga de las partículas coloidales, haciendo que la formación de los microflóculos sea muy escasa y que la turbiedad residual sea elevada.
- Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduciendo a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, causando que la turbiedad residual sea igualmente elevada.

⌘ Turbiedad: La concentración de las partículas causantes de la turbiedad permite realizar las siguientes predicciones:

- Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante, con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbiedad es alta la cantidad de coagulante que se debe adicionar no es elevada, debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es significativa, por lo que la coagulación se realiza con facilidad; por el contrario cuando la turbiedad es baja, la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuese alta.

Adicionalmente a los factores químicos que afectan las reacciones de coagulación, están las características propias de la mezcla rápida, entre ellas:

⌘ Condiciones de Mezcla: El grado de agitación que se proporciona a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido llevada a cabo completamente y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

⌘ Sistemas de aplicación de los coagulantes: Se considera que una reacción adecuada del coagulante con el agua se produce cuando la dosis del coagulante es adicionada al agua en forma constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida, de tal manera que el coagulante sea completamente distribuido y mezclado con el agua.

1.1.5 Dispositivos usados para mezcla rápida^{10,18}

Las unidades normalmente utilizadas para producir la mezcla rápida se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo del tipo de energía utilizada para producir la agitación: mecánica e hidráulica. Las primeras plantas de tratamiento que se construyeron no tenían dispositivos especiales para la dispersión de los productos químicos. Los primeros dispositivos para la mezcla rápida fueron hidráulicos. Con el desarrollo de la técnica del tratamiento de agua,

se pasó a dar preferencia a los mezcladores mecánicos, principalmente en los países industrializados.

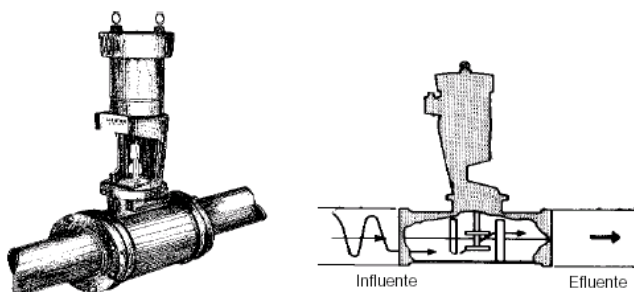
En los mezcladores mecánicos, la turbulencia necesaria para la mezcla proviene de una fuente externa, generalmente un motor eléctrico que es fácilmente controlable. Por otro lado, la potencia disipada en los mezcladores hidráulicos tiene origen en el trabajo interno del fluido y, por lo tanto, es función de la forma geométrica del mezclador y de las características del flujo, lo que hace que las condiciones de mezcla sean difíciles de controlar por el operador.

1.1.5.1 Dispositivos Mecánicos

Existen dos tipos de unidades de mezcla mecánica: el mezclador mecánico en línea y el retromezclador, que es la unidad más conocida.

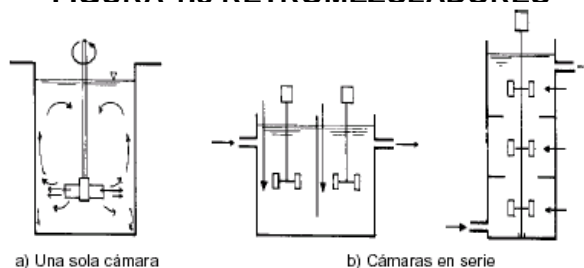
a) Mezclador mecánico en línea: Este tipo de agitador puede reemplazar a los retromezcladores, debido a que proporciona una agitación casi instantánea, mezclando en un volumen muy pequeño y con un bajo consumo de energía, su esquema puede apreciarse en la figura 1.7.

FIGURA 1.7 MEZCLADOR MECÁNICO EN LÍNEA



FUENTE: DE VARGAS (2004)

b) Retromezclador: Está compuesto de un tanque diseñado para un período de retención determinado y un sistema de agitación, como en la Figura 1.8.

FIGURA 1.8 RETROMEZCLADORES

FUENTE: DE VARGAS (2004)

1.1.5.2 Dispositivos Hidráulicos

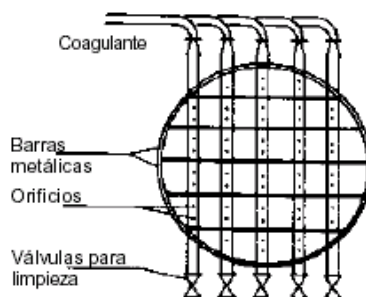
Las unidades hidráulicas más comunes son los mezcladores en línea y las de resalto hidráulico.

a) Mezcladores en línea: El conocimiento de la rapidez con que se realizan las reacciones de adsorción – desestabilización, trajo como consecuencia que se desarrollaran los mezcladores instantáneos en línea. Con este tipo de unidades es posible conseguir tiempos de mezcla muy cortos, menores a un segundo, y elevadas intensidades de mezcla.

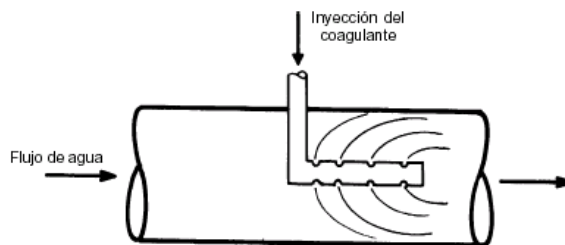
Estas unidades están constituidas por un dispositivo insertado en la tubería o canal de llegada de agua cruda a la planta de tratamiento.

De acuerdo con sus características, se pueden clasificar, a su vez, en difusores, inyectoros y estáticos.

i) Difusores: Estas unidades tratan de conseguir la mayor dispersión y mezcla del coagulante, mediante el uso de múltiples puntos de descarga distribuidos en toda la sección de la unidad, como se ve en la Figura 1.9.

FIGURA 1.9 DIFUSORES**FUENTE:** DE VARGAS (2004)

ii) Inyectores: En este tipo de unidades la energía necesaria para la mezcla rápida se consigue sobre la base de la energía disipada por una multitud de chorros que producen un flujo turbulento en la tubería de conducción de agua, lo que puede observarse en la Figura 1.10.

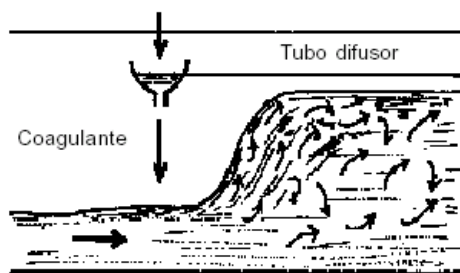
FIGURA 1.10 INYECTORES**FUENTE:** DE VARGAS (2004)

iii) Mezcladores estáticos: Estas unidades están constituidas por barras, perfiles o láminas corrugadas, instaladas dentro de una tubería, que forman una rejilla alargada y continua, las cuales producen una gran turbulencia en una longitud deseada y originan una mezcla de alta eficiencia, con poca pérdida de energía y sin el uso de partes móviles, como en la Figura 1.11.

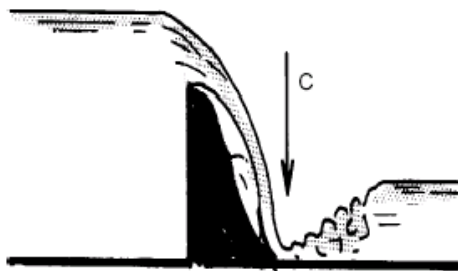
FIGURA 1.11 MEZCLADOR ESTÁTICO**FUENTE:** DE VARGAS (2004)

b) Resalto hidráulico: Es un fenómeno que ocurre cuando la corriente líquida pasa de un régimen rápido a uno tranquilo, a través de una profundidad crítica, y discurre de una profundidad menor a una mayor, mientras que la velocidad cambia de mayor a menor, como se ve en la Figura 1.12.

Los resaltos pueden producirse en canales horizontales o de fondo inclinado. Son frecuentemente utilizados para producir mezcla rápida en canales rectangulares con cambio brusco de inclinación.

FIGURA 1.12 RESALTO HIDRÁULICO¹⁰**FUENTE:** DE VARGAS (2004)

También es posible utilizar para este fin un vertedero rectangular sin contracciones, instalado dentro de un canal de sección rectangular, como el de la Figura 1.13.

FIGURA 1.13 VERTEDERO RECTANGULAR

FUENTE: DE VARGAS (2004)

Otro tipo de dispositivo muy utilizado en las plantas de tratamiento con la doble finalidad de medir el caudal y efectuar la mezcla rápida es el aforador Parshall, que se verá más adelante.

La forma más común de inyectar las sustancias coagulantes en estos dispositivos, se realiza con la inyección sobre la superficie del agua.

El gradiente de velocidad óptimo para este tipo de unidades es de aproximadamente 1.000 s^{-1} o mayores.^{1,10}

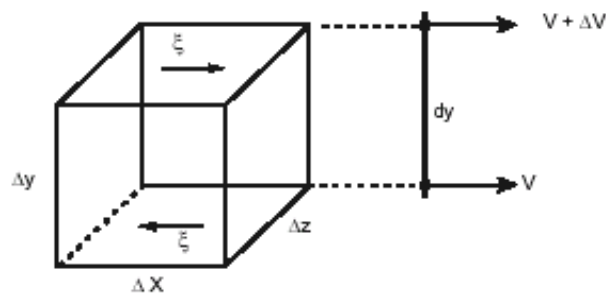
1.1.6 Potencia consumida y Gradientes de Velocidad^{5,10}

En todo proceso de mezcla, cualquiera sea su naturaleza, existe un consumo de energía para producir la turbulencia necesaria. La intensidad de la mezcla, hidráulica o mecánica, puede determinarse mediante el parámetro gradiente de velocidad.

El gradiente de velocidad, comúnmente indicado por la letra G , puede ser fácilmente calculado por la ecuación de Camp y Stein, cuya deducción matemática simplificada se representa a continuación, utilizando para ello la Figura 1.14.

Considérese un elemento de fluido x y z, sujeto a agitación hidráulica o mecánica en el proceso de mezcla:

FIGURA 1.14 ELEMENTO DE FLUIDO SUJETO A MEZCLA HIDRÁULICA O MECÁNICA



FUENTE: DE VARGAS (2004)

La potencia disipada está dada por:

$$P = (F)_{xv} \quad (1.8)$$

Luego:

$$P = \tau \cdot A_{x,z} \quad (1.9)$$

$$P = \zeta (\Delta x \cdot \Delta z) \Delta v \cdot \frac{\Delta y}{\Delta y} \quad (1.10)$$

Donde

P es la potencia (vatios)

Como:

$$\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \forall \quad (1.11)$$

Donde

V es el volumen (m³)

La ecuación 1.10 se convierte en:

$$\frac{P}{\nabla} = \zeta \frac{d}{y} \quad (1.12)$$

Donde

$\frac{P}{\nabla}$ es la potencia disipada por unidad de volumen (N/m².s)

Para un líquido newtoniano:

$$\zeta = \mu \frac{d}{y} \quad (1.13)$$

Donde

μ es el coeficiente de viscosidad dinámica (N.s/m²)

Sustituyendo en la ecuación 1.13, resulta:

$$\frac{P}{\nabla} = \mu \left[\frac{d}{y} \right]^2 \quad (1.14)$$

y,

$$\frac{d}{y} = G \quad (1.15)$$

Donde G es el gradiente de velocidad.

Y por tanto, para mezcla mecánica:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \nabla}} \quad (1.16)$$

El gradiente de velocidad se expresa en s⁻¹.

Mientras que para mezcla hidráulica, la expresión es:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma H}{\mu t}} \quad (1.17)$$

Donde

H es la pérdida de carga (m) y t es el tiempo de retención (s)

Siendo:

$$t = \frac{Q}{V} \quad (1.18)$$

Donde

Q es caudal (m³/s) y V es el volumen del fluido (m³)

Al aumentar el gradiente de velocidad el flóculo se hace más pequeño pero a la vez más compacto, teniendo una mayor velocidad de sedimentación. Al contrario, el flóculo producido con baja velocidad de agitación es grande y esponjoso y sedimenta con dificultad.

1.2 PRINCIPIOS HIDRÁULICOS DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS^{8,13,14}

1.2.1 Energía Específica

Constituye un concepto esencial dentro de la hidráulica de flujo en canales abiertos. De la mecánica de fluidos elemental, se conoce que la energía total de una porción de agua que viaja sobre una línea de corriente está dada por la ecuación de Bernoulli, como en la Ecuación 1.19. Esto puede apreciarse en la Figura 1.15, así:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (1.19)$$

Donde

H es la energía total

z es la elevación de la línea de corriente sobre un plano de referencia

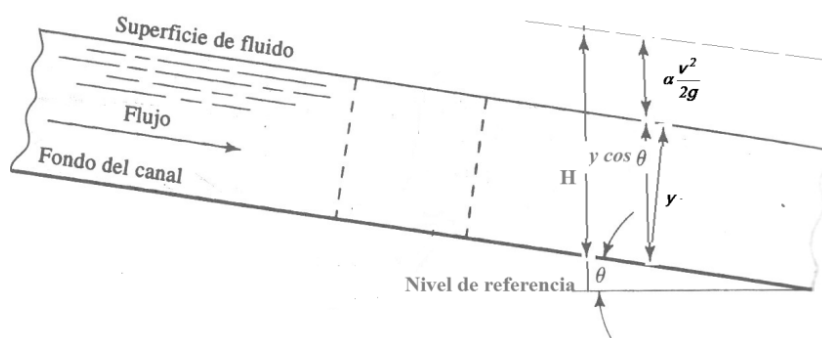
p es la presión

γ es el peso específico del fluido

v es la velocidad de la línea de corriente

g es la aceleración de la gravedad

FIGURA 1.15 COMPONENTES DE LA ENERGÍA



FUENTE: MOTT (1996)

En un flujo paralelo, donde las distribuciones de presiones hidrostáticas en donde la divergencia y curvatura de las líneas de corriente son despreciables, la suma $z + \frac{p}{\gamma}$ es constante e igual al calado del flujo y si el plano de referencia es tomado como el fondo del canal. Entonces, la energía por unidad de peso del líquido, o energía específica, en canal abierto, relativa al fondo del canal es

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (1.20)$$

Donde

α es un factor de corrección de energía cinética que es usado para corregir la no uniformidad del perfil de velocidad

v es la velocidad promedio del flujo (m/s), entendida como

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1.21)$$

Donde

Q es el caudal transportado en el canal (m^3)

A es el área hidráulica (m^2)

La Ecuación 1.20 es válida para cuando la pendiente del canal es pequeña, o $c \theta \approx 1$, esto para $\theta < 10^\circ$.

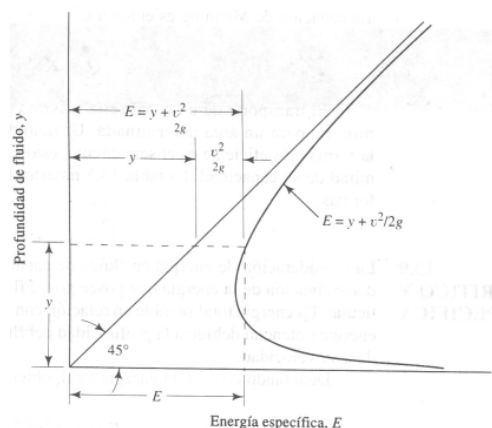
Considerando la definición de la velocidad, la ecuación 1.20 también puede escribirse como

$$E = y + \alpha \frac{Q^2}{2g A^2} \quad (1.22)$$

1.2.2 Flujo crítico, subcrítico y supercrítico¹³

De la Ecuación 1.20, se deduce que si la sección del canal y el caudal son especificados, la energía específica es únicamente función del calado del flujo, y . Si y es graficado contra E , como en la Figura 1.16, se obtiene una curva con dos ramas que permite visualizar los posibles regímenes de flujo en un canal.

FIGURA 1.16 VARIACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA CON LA PROFUNDIDAD

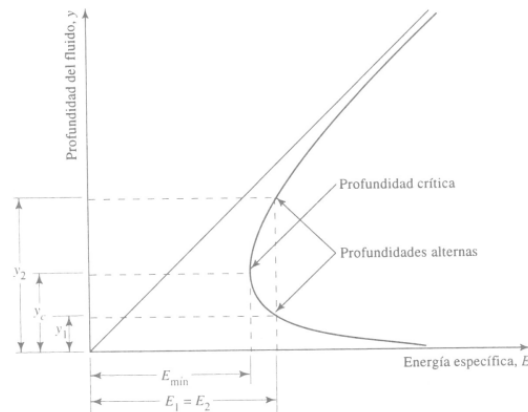


FUENTE: MOTT (1996)

Esta curva presenta algunas características importantes: la línea a 45° en la gráfica, representa la recta $E = y$, y para cualquier punto sobre esa recta, la distancia horizontal desde el eje y , representa la energía potencial y . La distancia que queda a la curva de energía específica es la energía cinética $\frac{v^2}{2g}$.

La profundidad que corresponde a la energía específica mínima es la profundidad crítica y_c . Para cualquier profundidad mayor que y_c , el flujo es subcrítico, mientras que para cualquier profundidad menor que y_c , el flujo es supercrítico. En la Figura 1.17, para cualquier nivel de energía mayor que el mínimo, existen dos profundidades diferentes. Tanto y_1 , abajo del calado crítico, como y_2 , encima del calado crítico, tienen la misma energía. En el caso de y_1 el flujo es supercrítico, y mucha de la energía es energía cinética debido a la alta velocidad de flujo. A la profundidad mayor, y_2 , el flujo es más lento y solamente una pequeña porción de la energía es cinética. Estas profundidades se conocen como “profundidades alternas” para la energía específica E .

FIGURA 1.17 PROFUNDIDAD CRÍTICA Y PROFUNDIDADES ALTERNAS



FUENTE: MOTT (1996)

Cuando la energía específica es mínima y se ha alcanzado el calado o profundidad crítica, partiendo de la Ecuación 1.22, se tiene

$$\frac{d}{E_d} = 1 - \alpha \frac{Q^2 d}{g A d} = 0 \quad (1.23)$$

También

$$\frac{d}{y} = B \quad (1.24)$$

Donde

B es el ancho del espejo de agua o superficie (m)

Entonces

$$\frac{Q^2 B}{A^3 g} = 1 \quad (1.25)$$

Sabiendo que

$$\frac{A}{B} = Y \quad (1.26)$$

Donde Y es la profundidad hidráulica (m)

La ecuación 1.25 se transforma en

$$\frac{v^2}{gY} = 1 \quad (1.27)$$

El término $\frac{v^2}{gY}$ es una expresión adimensional, cuya raíz cuadrada se conoce como “número de Froude (F)”, que se expresa

$$F = \frac{v}{\sqrt{gY}} \quad (1.28)$$

Este número de Froude representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales del flujo. El término \sqrt{gY} es la velocidad de la onda de gravedad o celeridad de la onda que se genera por efecto de una perturbación en el flujo.

De la ecuación 1.27 se deduce que cuando el flujo es crítico, el número de Froude es igual a 1 y a partir de esta deducción se puede ahora definir los tipos de flujos, así:⁸

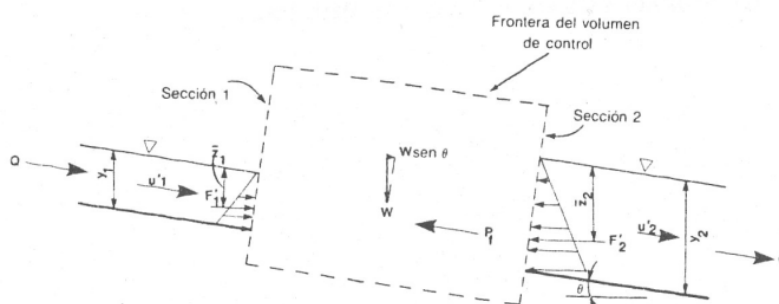
- ⌘ Flujo subcrítico: Es un flujo lento que ocurre cuando la profundidad del flujo es mayor que el calado o profundidad crítica y por lo tanto el número de Froude es menor que 1 ($F < 1$). En estas condiciones la velocidad del flujo no es lo suficientemente alta para arrastrar aguas abajo la onda de gravedad generada por alguna perturbación, misma que se propaga aguas arriba.
- ⌘ Flujo supercrítico: Es un flujo rápido que ocurre cuando la profundidad del flujo es menor que el calado o profundidad crítica y por lo tanto el número de Froude es mayor que 1 ($F > 1$). En estas

condiciones la velocidad del flujo y por tanto las fuerzas inerciales son mayores que las de gravedad, por lo que la onda de gravedad generada por alguna perturbación se propaga aguas abajo.

1.2.3 Cantidad de Movimiento^{12,19}

Aplicando la segunda ley de Newton al flujo en canales abiertos y observando la Figura 1.18, se deduce que dentro del volumen de control definido, existe una pérdida desconocida de energía, y la acción de una fuerza que actúa sobre el flujo entre las secciones 1 y 2, esto da como resultado un cambio en la cantidad de movimiento lineal del flujo.

FIGURA 1.18 ESQUEMA PARA LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO



FUENTE: MOTT (1996)

Matemáticamente, se obtiene

$$F'_1 + F'_3 - F'_2 - \sum f'_f - P'_f = \frac{\gamma}{g} Q (\beta_2 \bar{u}'_2 - \beta_1 \bar{u}'_1) \quad (1.29)$$

Donde

F'_1 y F'_2 son las componentes horizontales de la presión que actúan en las secciones 1 y 2, respectivamente (N)

F'_3 es la componente horizontal de W sen θ (N)

W es el peso del fluido entre las secciones 1 y 2 (N)

γ es el peso específico del fluido (N/m^3)

θ es el ángulo de la pendiente del canal

$\sum f'_f$ es la sumatoria de las componentes horizontales de las velocidades promedio del flujo en las secciones 1 y 2, respectivamente (m/s)

P'_f es la componente horizontal de la fuerza desconocida que actúa entre las secciones 1 y 2 (N)

β_1 y β_2 son coeficientes de corrección de la cantidad de movimiento

Se supone que θ es pequeño, que $\beta_1 = \beta_2$ y que $\sum f'_f = 0$, también que

$$F = \gamma \bar{z} A \quad (1.30)$$

Donde

z es la distancia al centroide del área hidráulica A desde la superficie libre

La ecuación 1.29 se convierte en

$$\gamma \bar{z}_1 A_1 - \gamma \bar{z}_2 A_2 - P'_f = \frac{\gamma}{g} Q (\beta_2 \bar{u}'_2 - \beta_1 \bar{u}'_1) \quad (1.31)$$

Sustituyendo las velocidades con la ecuación 1.21, queda

$$\frac{P'_f}{\gamma} = \left(\frac{Q^2}{g} + \bar{z}_1 A_1 \right) - \left(\frac{Q^2}{g} + \bar{z}_1 A_2 \right) \quad (1.32)$$

O también

$$\frac{P'_f}{\gamma} = M_1 - M_2 \quad (1.33)$$

Donde

M es la función "momentum" o fuerza específica

1.2.4 Resalto Hidráulico¹⁴

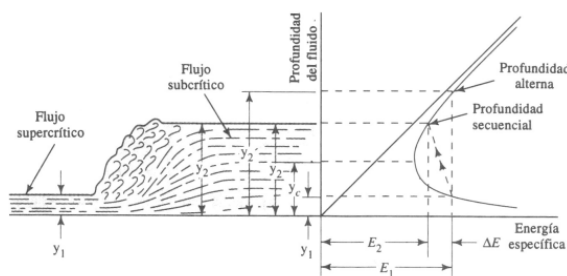
El resalto hidráulico es el proceso por el cual un flujo es bruscamente variado con una transición de flujo supercrítico a un flujo subcrítico. Va acompañado por una turbulencia y una disipación de energía importantes.

El resalto hidráulico tiene varias aplicaciones, entre otras:

- ⌘ Disipación de energía en flujos sobre varias estructuras hidráulicas.
- ⌘ Aireación de flujos y desclorinado en el tratamiento de aguas.
- ⌘ Control de condiciones específicas de flujo.
- ⌘ Mezcla de sustancias químicas en el tratamiento o purificación del agua.

La Figura 1.19 ilustra cómo se da un resalto hidráulico utilizando una curva de energía específica. El flujo entra al resalto con una energía E_1 que corresponde a una profundidad supercrítica y_1 . En el resalto, se incrementa bruscamente la profundidad. De no existir la disipación profundidad sería y'_2 , que es la profundidad alterna para y_1 pero gracias a dicha disipación, el flujo alcanza la profundidad y_2 , que corresponde al nivel de de energía, la nueva energía E_2 . Esta profundidad se encuentra en el rango subcrítico, y se suele llamar “profundidad secuencial”.

FIGURA 1.19 ENERGÍA Y PROFUNDIDADES DE UN RESALTO HIDRÁULICO



FUENTE: MOTT (1996)

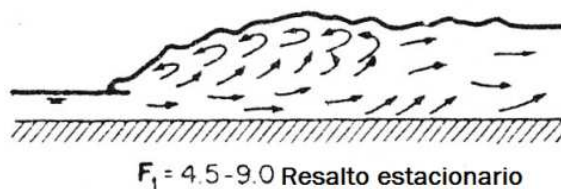
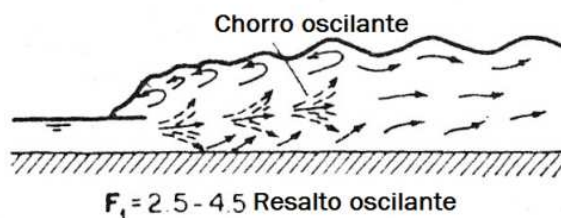
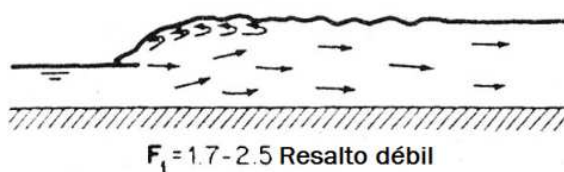
1.2.4.1 Tipos de Resalto Hidráulico⁸

El resalto hidráulico puede clasificarse en varios tipos, de acuerdo al número de Froude en la sección de flujo supercrítico del resalto F_1 , así:

- ⌘ **Para $F_1 = 1$** , el flujo es crítico y no puede formarse resalto.
- ⌘ **Para $F_1 = 1$ a 1.7** , el resalto es “ondulado”, la superficie del agua muestra ondulaciones.
- ⌘ **Para $F_1 = 1.7$ a 2.5** , el resalto es “débil”, la superficie del agua muestra ligeras ondulaciones que desaparecen aguas abajo, la disipación de energía es baja.
- ⌘ **Para $F_1 = 2.5$ a 4.5** , el resalto es “oscilante”, existen chorros oscilantes en el fondo del resalto, que pueden causar daños en las estructuras aguas abajo, la disipación de energía es baja.
- ⌘ **Para $F_1 = 4.5$ a 9** , el resalto es “estacionario”, es el que mejores características presenta, la disipación de energía es del 40 al 70%, es independiente de la variación del nivel del agua aguas abajo.
- ⌘ **Para $F_1 > 9$** , el resalto es “fuerte”, se observan ondas que viajan aguas abajo, con una superficie del agua con apariencia rugosa, la disipación de energía puede alcanzar hasta un 85%.

Un esquema de los tipos de resaltos hidráulicos explicados, puede apreciarse en la Figura 1.20.

FIGURA 1.20 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO



FUENTE: CHOW (1982)

1.2.4.2 Cálculo de las profundidades alternas⁸

Si se considera el flujo en un canal de sección rectangular, en el que $P'_f = 0$, y el ancho del canal sea B , la ecuación 1.33 se transforma en

$$\frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2} \right) = \frac{1}{2} (y_2^2 - y_1^2) \quad (1.34)$$

Donde q es el caudal por unidad de ancho:

$$q = \frac{Q}{B} \quad (1.35)$$

La ecuación 1.34 tiene las siguientes soluciones

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right) \quad (1.36)$$

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (1.37)$$

1.2.4.3 Cálculo de la pérdida de Energía⁸

Del análisis de la Figura 1.21, se advierte que existe un cambio de energía en el resalto, que es

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (1.38)$$

Para el caso de un canal de sección rectangular, la pérdida puede calcularse de la forma

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad (1.39)$$

1.2.4.4 Cálculo de la longitud del Resalto⁸

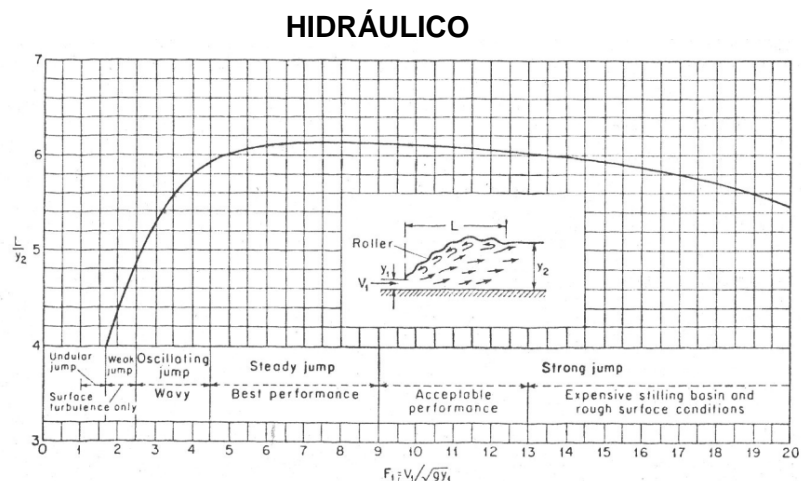
Puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediata aguas debajo de la ola del resalto.

A pesar de que constituye un parámetro muy importante en el diseño, en general, la longitud del resalto no puede establecerse a partir de consideraciones teóricas.

Se han realizado varias investigaciones al respecto, mismas que han arrojado resultados diferentes y hasta contradictorios.

Sin embargo, puede considerarse como aceptable el uso de la Figura 1.21 para determinar la longitud del resalto, diagrama en el que se tienen los datos de F_1 versus L/y_2 .

FIGURA 1.21 GRÁFICA PARA EL CÁLCULO DE LA LONGIUD DEL RESALTO



FUENTE: CHOW (1982)

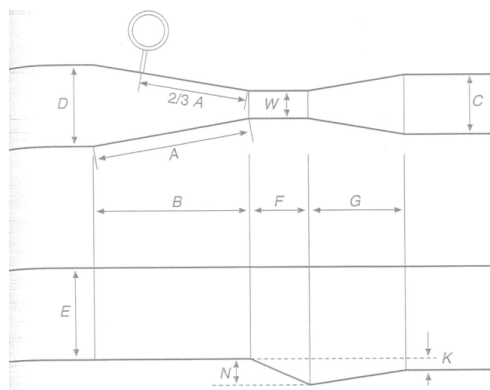
1.3 AFORADOR PARSHALL^{5,16}

El aforador Parshall fue construido, en un inicio, con fines de riego en actividades agrícolas y para el control de las velocidades de flujo en plantas de tratamiento de agua. Más recientemente, se ha venido utilizando, de forma común en nuestro medio como un dispositivo de mezcla rápida para la dispersión de coagulantes en los tratamientos de agua.

1.3.1 Descripción^{5,16}

Es una estructura hidráulica llamada también “resbaladero de régimen crítico”, que constituye una contracción en la corriente que provoca que el flujo alcance su profundidad crítica dentro de la misma, produciendo un resalto hidráulico al final de ésta. Consta de una sección convergente, una garganta o estrangulación y una sección divergente. En todas estas secciones, presenta una sección transversal rectangular. Su geometría puede observarse en la Figura 1.22. Son dimensionados por el ancho de la garganta, y la inclinación en la sección convergente es de 9:24, mientras que para la sección divergente, es de 1:6.

FIGURA 1.22 GEOMETRÍA DEL AFORADOR PARSHALL



FUENTE: AZEVEDO (1977)

En la Figura 1.22, las dimensiones que aparecen son:

A es la longitud de las paredes de la sección convergente

B es la longitud de la sección convergente

C es el ancho de la salida

D es el ancho de la entrada a la sección convergente

E es la profundidad total

F es la longitud de la garganta

G es la longitud de la sección divergente

K es la diferencia de elevación entre la salida y la cresta

N es la profundidad de la cubeta

W es el ancho de la garganta

El caudal puede determinarse mediante la ecuación de la forma

$$Q = \lambda H^n \quad (1.40)$$

Donde

Q es el caudal (m^3/s)

H es el calado del agua en la sección convergente del aforador que puede medirse directamente o calcularse a partir del caudal (m)

λ y n son constantes que dependen de las dimensiones del aforador, y pueden observarse en la Tabla 1.1.

TABLA 1.1 DIMENSIONES DE LOS AFORADORES PARSHALL

	W	A	B	C	D	E	F	G	K	N	λ	n
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9	—	—
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	0,176	1,547
6"	15,2	62,3	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4	0,381	1,580
9"	22,9	88,1	86,4	38,1	57,5	76,2	30,5	45,7	7,6	11,4	0,535	1,530
1'	30,5	137,1	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	0,690	1,522
1 ¹ / ₂ '	45,7	144,8	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,054	1,538
2'	61,0	152,3	149,3	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,426	1,550
3'	91,5	167,5	164,2	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	2,182	1,566
4'	122,0	182,8	179,2	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	2,935	1,578
5'	152,5	198,0	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	3,728	1,587
6'	183,0	213,3	209,1	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	4,515	1,595
7'	213,5	228,6	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	5,306	1,601
8'	244,0	244,0	239,0	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	6,101	1,606
10'	305,0	274,5	260,8	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	—	—

FUENTE: AZEVEDO (1977)

Para fines prácticos, se recomienda usar la ecuación:⁵

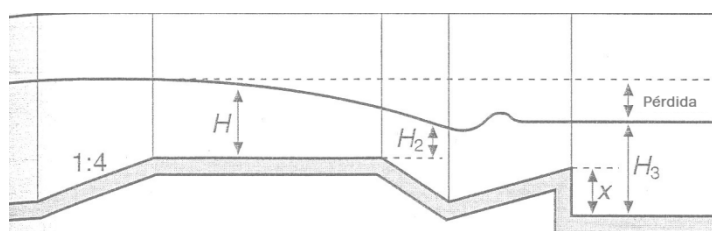
$$Q = 2,2H^{\frac{3}{2}} \quad (1.41)$$

De acuerdo al esquema de la Figura 1.23, se definen otros términos de importancia en el funcionamiento del aforador Parshall, así:

H_3 : profundidad normal del agua en el canal (m)

H_2 : altura en la garganta, que no puede sobrepasar del 60 o 70 % de H en régimen libre (m)

FIGURA 1.23 PROFUNDIDADES DE IMPORTANCIA EN EL AFORADOR PARSHALL



FUENTE: AZEVEDO (1977)

1.3.2 Criterios de utilización^{5,11}

Para el correcto funcionamiento del aforador como mezclador rápido, se recomienda, de forma general:

- No ubicar el aforador Parshall en lugares en los que exista grandes turbulencias en su sección inicial, esto es, no debe instalarse enseguida luego de una compuerta o una curvatura del flujo, puesto que las turbulencias provocadas en el agua podrían causar interferencia en los resultados obtenidos.
- La velocidad que el flujo alcance en la garganta debe ser cercana a 2 m/s.
- El número de Froude debe estar comprendido entre 1.7 a 2.5 o entre 4.5 a 9.0. Deben evitarse los números entre 2.5 y 4.5 que producen un resalto inestable, que se mueve constantemente, lo que dificulta la aplicación de los coagulantes.

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia del aforador Parshall como unidad de mezcla rápida, mediante la adición al agua de un trazador en dos puntos del aforador con una dosis y caudal conocidos y que posteriormente sea fácilmente detectable por métodos de laboratorio.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO²⁰

Para la realización de la presente Tesis de Grado, se utilizó el modelo del aforador Parshall construido en el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional.

El laboratorio cuenta con un sistema de bombeo del agua que se encuentra en canales de reserva alrededor del mismo.

Este sistema de bombeo consta de tres bombas centrífugas de eje horizontal, ubicadas en el subsuelo del Laboratorio. Las bombas se aprecian en la Figura 2.1. Para este proyecto se utilizó la bomba que maneja un caudal máximo de 300 l/s y trabaja con un voltaje de 200 V.

El agua bombeada llega a un tanque elevado, a 3.5 m del suelo, de dimensiones: 1.55 m x 4.55 m x 8.6 m y cuyas paredes tienen 0.16 m de espesor, que se aprecia en la Figura 2.2.

FIGURA 2.1 BOMBAS DEL LABORATORIO DE INVESTIGACIONES HIDRÁULICAS

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Noviembre 2010)

FIGURA 2.2 TANQUE ELEVADO

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Noviembre 2010)

De la base del tanque elevado sale una tubería de acero galvanizado de 17.5 cm de diámetro y de longitud total 6 m que cuenta con dos codos y una válvula de cierre, la que se utilizó para regular el flujo hacia el aforador. Esta tubería descarga el agua en un primer tanque de carga, unido a un segundo tanque mediante un orificio de fondo. El primer tanque tiene las siguientes dimensiones: 1.95 m x 0.82 m x 0.86 m, mientras que las del segundo son 1.95 m x 1.16 m x 0.86 m, que se observan en la figura 2.3.

El segundo tanque cuenta en su parte superior con un vertedero triangular de 60°, por donde se descarga el agua al canal de entrada, que se aprecia en la Figura 2.4.

FIGURA 2.3 TANQUES DE CARGA



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

FIGURA 2.4 VERTEDERO TRIANGULAR 60°



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

En la Figura 2.5 se observa la pantalla que se ubica en el canal de entrada y permite estabilizar el flujo antes de alcanzar el aforador.

FIGURA 2.5 CANAL DE ENTRADA



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Enero 2011)

Luego del canal de entrada se encuentra el aforador Parshall, construido en acrílico transparente, cuyas dimensiones aparecen en el Anexo 4. El aforador Parshall descarga en un tanque también construido en acrílico transparente, de dimensiones 1 m de largo, 0.4 m de ancho y originalmente 0,4 m de alto, dimensión que fue aumentada a 0,5 m para la presente investigación, puesto que el tamaño del tanque, con la altura original, no era suficiente para aceptar la cantidad de agua circulante con el máximo caudal de trabajo, lo que causaba el derrame de excesiva cantidad de la misma, dificultando la toma de muestras. El aforador y el tanque se pueden ver en la Figura 2.6. A continuación del tanque, se encuentra un aforador Palmer Bowlus y finalmente una tubería de descarga del agua hacia los canales de reserva, para ser recirculada, esto puede verse en la Figura 2.7.

FIGURA 2.6 AFORADOR PARSHALL Y TANQUE DE DESCARGA

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

FIGURA 2.7 AFORADOR PALMER BOWLUS Y TUBERÍA DE DESCARGA

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

2.2 ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA

Se realizaron los ensayos de mezcla rápida utilizando el modelo del aforador Parshall descrito anteriormente, escogiendo tres caudales de trabajo. Para la determinación de dichos caudales se utilizó la curva de descarga del aforador Parshall obtenida del Proyecto de Titulación ANÁLISIS DE MEDIDORES

DE CAUDAL PARA FLUJO SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO, TORRES, C., VÁSQUEZ, E., 2010, que puede apreciarse en el Anexo 1.

Los caudales de trabajo escogidos para los ensayos de mezcla rápida fueron los siguientes: 20, 67 l/s, 30,17 l/s y 46,09 l/s, que es el caudal máximo que el modelo admite sin que los tanques se desborden.

Para los diferentes caudales, se realizaron mediciones de los calados en puntos ubicados a lo largo del aforador, para determinar luego los parámetros hidráulicos de interés para la investigación, estos datos pueden observarse en el Anexo 2.

Para determinar el grado de mezcla obtenido con cada caudal, se utilizó una solución de cloruro de sodio, sustancia de fácil manejo, que permite una sencilla detección de sus concentraciones y cuya solubilidad en el agua no se ve afectada por las variaciones de temperatura.⁶

La concentración de la solución de cloruro de sodio fue determinada a partir de la curva de calibración Conductividad eléctrica vs. Concentración, que se encuentra en el Anexo 3, que se realizó preparando soluciones de diferentes concentraciones, cuya conductividad eléctrica fue determinada con el medidor multiparámetros OAKLON PC 510, del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional., que aparece en la Figura 2.8. La concentración escogida para los ensayos fue de 100 g/l, lo que equivale a 57.4 mS.

FIGURA 2.8 MEDIDOR MULTIPARÁMETRO OAKLON PC 510



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Enero 2011)

Esta solución fue inyectada al agua circulante mediante una bomba peristáltica COLE PALMER MASTER FLEX, provista por el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas, con un caudal de 0.05 l/s, que se aprecia en la Figura 2.9.

FIGURA 2.9 BOMBA PERISTÁLTICA COLE PALMER MASTER FLEX



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

La inyección de la solución se realizó en dos puntos del aforador: uno en la sección convergente (Punto A), ubicado a 15 cm antes de la garganta y otro en la garganta (Punto B), como se ve en el esquema de la Figura 2.10. Para cada uno de estos puntos, se escogieron tres posiciones de inyección: sobre la

superficie del agua, en el fondo del canal con el flujo hacia arriba y en el fondo del canal con el flujo en contracorriente.

FIGURA 2.10 ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE INYECCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

Se inyectó la solución mediante mangueras de polietileno rígido, de $\frac{1}{4}$ plg de diámetro, con perforaciones 3 mm de diámetro, en forma de flauta para tener mayor uniformidad en la inyección del trazador. Para el punto de inyección A, se utilizó una manguera de 14.5 cm con 9 perforaciones, ubicadas a 1.6 cm cada una; para el punto B, la manguera utilizada fue de 8,5 cm, con 9 perforaciones, separadas 0.9 cm, como se ve en la Figura 2.11.

Para monitorear la distribución del cloruro de sodio añadido al agua circulante, se diseñó un sistema de toma de muestras que consistió en mallas de acero soldado de 2,5 cm de abertura y de 2 mm de diámetro de alambre y una serie de mangueras de vinil de $\frac{1}{8}$ plg de diámetro unidas a las mallas en puntos determinados de la sección transversal del flujo, de acuerdo al caudal, lo que se aprecia en la Figura 2.12.

FIGURA 2.11 MANGUERAS DE INYECCIÓN SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO



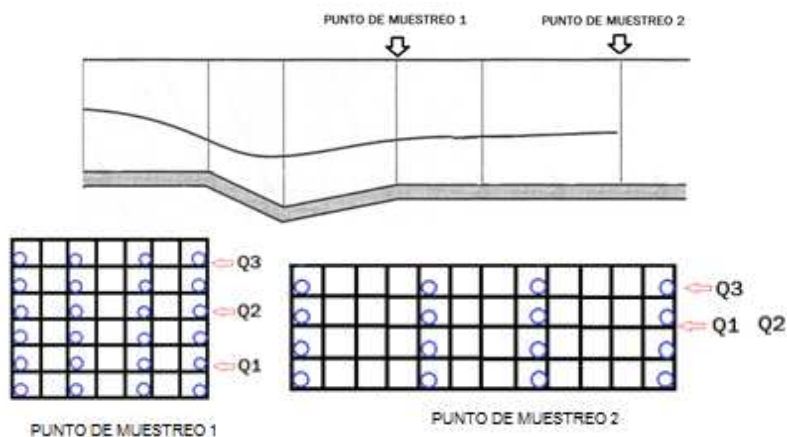
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

FIGURA 2.12 MALLAS Y MANGUERAS PARA LA TOMA DE MUESTRAS

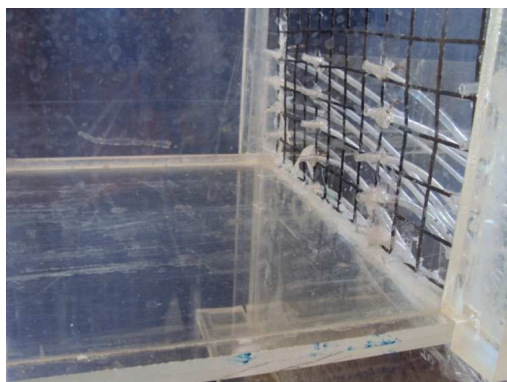


FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Diciembre 2010)

Se colocaron mallas en dos puntos del aforador: una de 17,5 cm de ancho a la salida de la garganta (Punto 1) y posteriormente otra de 30 cm al final de la estructura (Punto 2), como en la Figura 2.13, con la distribución mostrada de las mangueras. Para el punto 1, se ubicaron 24 mangueras, ubicadas en 6 filas y para el punto 2, se colocaron 12 mangueras, en puntos equidistantes en la malla. En la Figura 2.14 se aprecia cómo las mangueras se unieron a las mallas dejando un centímetro de las mismas libre dentro del flujo, para evitar que las muestras se vean alteradas por la presencia de la malla.

FIGURA 2.13 ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DE LAS MALLAS

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

FIGURA 2.14 SUJECIÓN DE LAS MANGUERAS EN LAS MALLAS

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2010)

El otro extremo de las mangueras se encontraba fijo en perforaciones realizadas en la pared del tanque de descarga del aforador, separadas 3.5 cm, que conducían las muestras hacia afuera del canal para ser recogidas en una serie de recipientes plásticos de 25 ml cada uno, ubicados en fila sobre una estructura plástica que permitía su fácil manipulación, como en la Figura 2.15.

Cada ensayo tuvo una duración aproximada de 25 s, medidos a partir de la inyección de la solución, en los cuales se tomaron tres muestras, que luego servirían para calcular un promedio de los valores obtenidos.

FIGURA 2.15 RECIPIENTES PLÁSTICOS Y MANGUERAS PARA LA TOMA DE MUESTRAS



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

Una vez tomadas las muestras, se procedió a la determinación de la conductividad eléctrica de las mismas, mediante el uso del medidor multiparámetro OAKLON Pc 510, representado en la Figura 2.16, posterior a la medición de la conductividad eléctrica del agua circulante.

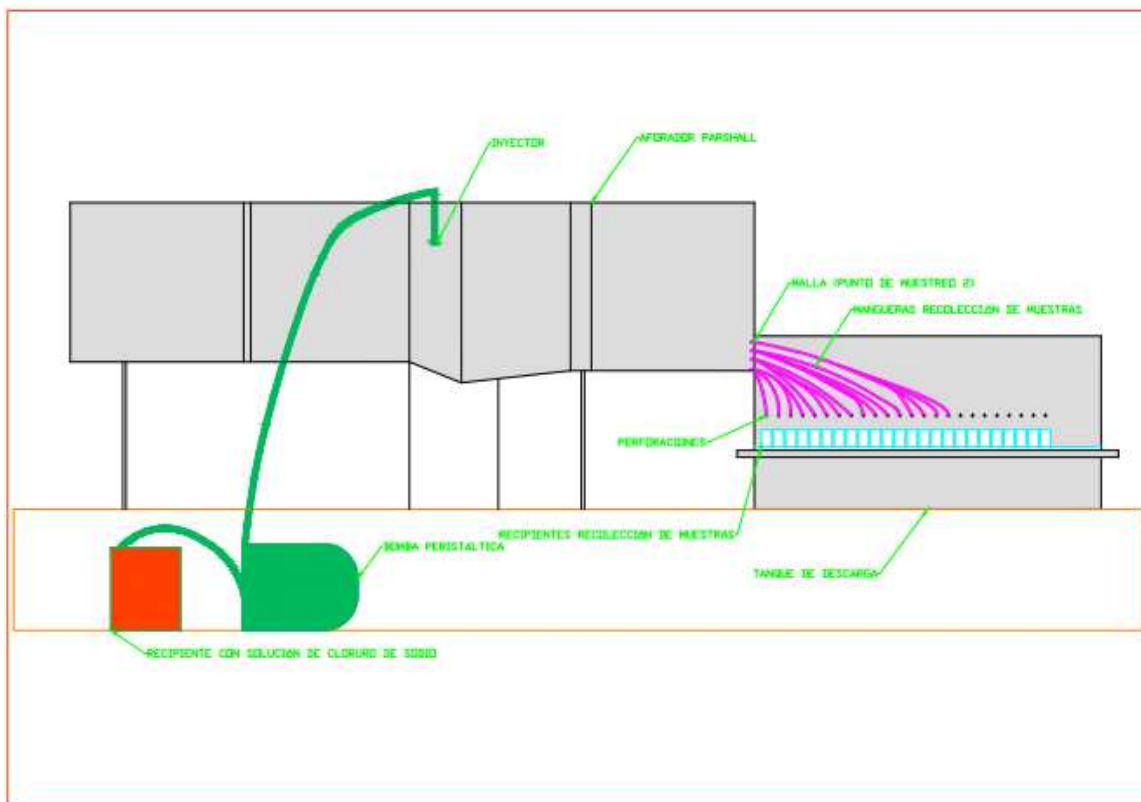
FIGURA 2.16 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

A continuación se muestra un esquema del modelo completo, con todos sus componentes, en la Figura 2.17.

FIGURA 2.17 FIGURA 2.17 ESQUEMA DEL MODELO DEL AFORADOR PARSHALL



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Febrero 2011)

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los parámetros hidráulicos evaluados para los tres caudales de trabajo.

3.1 PERFILES HIDRÁULICOS EN EL AFORADOR PARSHALL

En la Figura 3.1, se observa al aforador Parshall en funcionamiento con el mínimo caudal y se aprecia la forma que el líquido adquiere al pasar por el mismo.

FIGURA 3.1 AFORADOR PARSHALL EN FUNCIONAMIENTO



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás (Diciembre 2010)

En la Tabla 3.1 se observan los valores de las alturas alcanzadas por el agua en diferentes puntos del aforador Parshall para cada caudal.

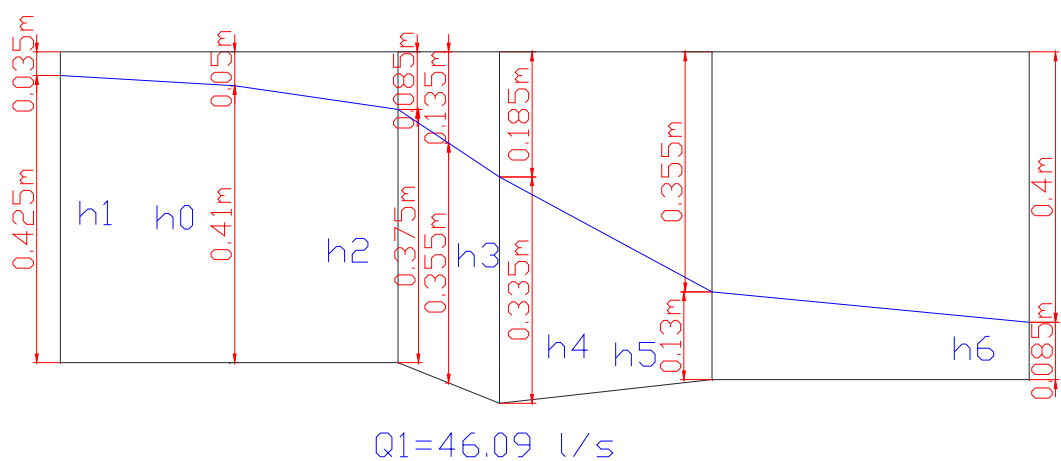
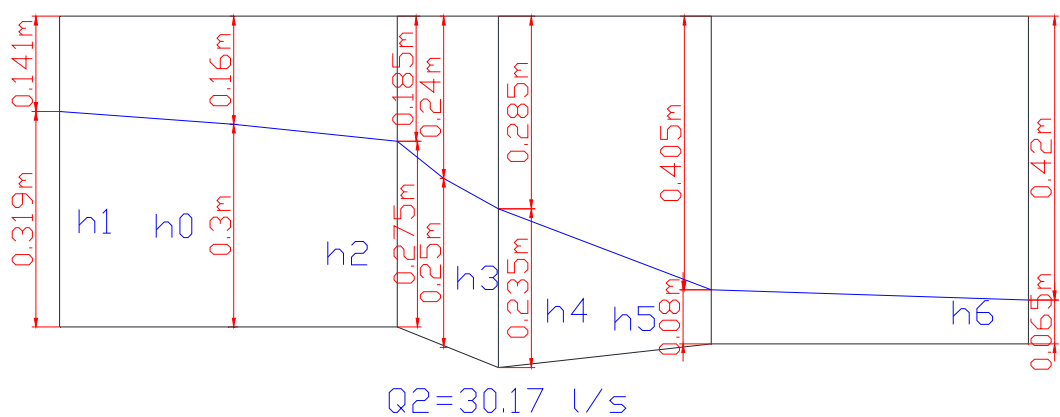
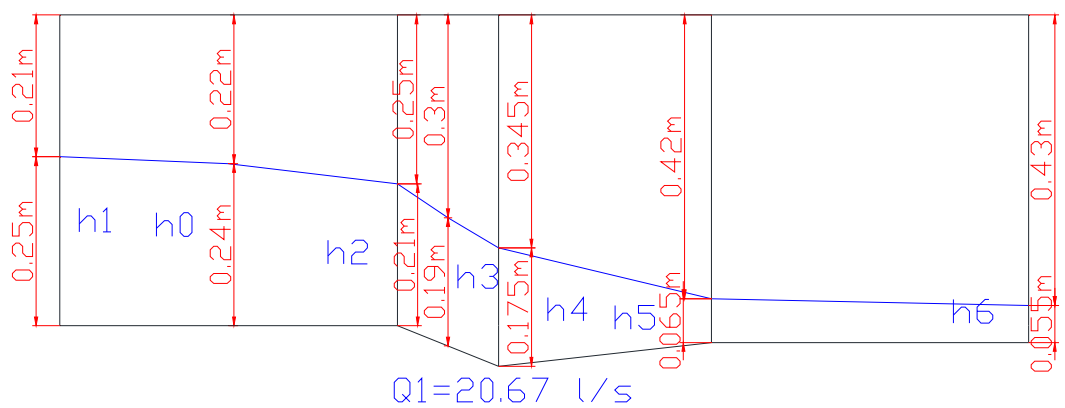
TABLA 3.1 CALADOS EN EL AFORADOR PARSHALL

Q₁= 20,67 l/s					
h₁ (m)	h₂ (m)	h₃ (m)	h₄ (m)	h₅ (m)	h₆ (m)
0,25	0,21	0,19	0,175	0,065	0,055
Q₂= 30,17 l/s					
h₁ (m)	h₂ (m)	h₃ (m)	h₄ (m)	h₅ (m)	h₆ (m)
0,319	0,275	0,25	0,235	0,08	0,065
Q₃= 46,09 l/s					
h₁ (m)	h₂ (m)	h₃ (m)	h₄ (m)	h₅ (m)	h₆ (m)
0,425	0,375	0,355	0,335	0,13	0,085

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

En el esquema de la Figura 3.2, se pueden ver representados los calados medidos para los tres caudales. Debe anotarse que, para las mediciones de los calados correspondientes al máximo caudal, existió cierta dificultad, puesto que el flujo, pese a contar con la malla estabilizadora, presenta cierta inestabilidad.

FIGURA 3.2 CALADOS DEL AGUA PARA LOS DIFERENTES CAUDALES



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

3.2 VELOCIDAD DEL AGUA EN LA GARGANTA DEL AFORADOR PARSHALL

Las velocidades del agua en la garganta presentadas en la Tabla 3.2, han sido calculadas utilizando los datos de los caudales y los calados del agua en la garganta, estos cálculos pueden apreciarse en el Anexo 6.

TABLA 3.2 VELOCIDAD DEL AGUA

Caudal (l/s)	Velocidad en la garganta (m/s)
20,67	1,28
30,17	1,42
46,09	1,53

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

Se observa que de las velocidades obtenidas, la correspondiente al caudal máximo, 1,53 m/s, se acerca a los criterios de utilización recomendados enumerados en el Capítulo I, en los que se afirma que la velocidad en la garganta debe ser cercana a 2 m/s para asegurar eficiencia en el funcionamiento del aforador Parshall como mezclador rápido.

3.3 TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA

En la Tabla 3.3, se muestran los valores del tiempo de retención del agua en la garganta del aforador, para cuyo cálculo se utilizó los datos de las velocidades reportadas en el apartado precedente y la longitud de la garganta. Estos cálculos se encuentran en el Anexo 6.

TABLA 3.3 TIEMPOS DE RETENCIÓN

Caudal (l/s)	Tiempo de retención (s)
20,67	0,117
30,17	0,106
46,09	0,098

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

De la observación de los resultados anteriores, se establece que a medida que aumenta el caudal, el tiempo de retención es menor, y que todos los tiempos de retención calculados resultan ser adecuados para el propósito de la mezcla rápida. En el Capítulo I, se expuso la importancia de que la mezcla rápida se lleve a cabo en un tiempo menor a 1 segundo, condición que cumplen los tiempos de retención calculados.

3.4 PÉRDIDA DE CARGA

Para el cálculo de la pérdida de carga, cuyos valores se presentan en la Tabla 3.4, se han utilizado los datos de la Tabla 3.1, tomando en cuenta los calados del agua en la parte inicial y final del aforador Parshall. Los cálculos correspondientes pueden apreciarse en el Anexo 6.

TABLA 3.4 PÉRDIDA DE CARGA

Caudal (l/s)	Pérdida de carga (m)
20,67	0,220
30,17	0,279
46,09	0,365

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

De los resultados anteriores, se observa que a medida que aumenta el caudal, aumenta también la pérdida de carga.

Los valores obtenidos indican que para lograr las pérdidas calculadas, que son relativamente pequeñas, no se requieren de instalaciones complicadas de gran tamaño.

3.5 GRADIENTES DE VELOCIDAD

Los gradientes de velocidad expuestos en la Tabla 3.5 fueron calculados utilizando los tiempos de retención y las pérdidas de carga obtenidos en los apartados anteriores, esto puede verse en el Anexo 6.

TABLA 3.5 GRADIENTES DE VELOCIDAD

Caudal (l/s)	Gradiente de velocidad (s^{-1})
20,67	421,18
30,17	1575,78
46,09	1874,48

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

De los resultados obtenidos, se aprecia que a medida que el caudal aumenta, lo hace también el valor de los gradientes de velocidad. Se expuso en el Capítulo I que para el aforador Parshall usado como mezclador rápido, los gradientes deben ser de al menos $1000 s^{-1}$ o mayores. Para los caudales de trabajo, se obtienen gradientes adecuados con el caudal medio y el máximo. El valor del gradiente de velocidad correspondiente al caudal más bajo se encuentra muy alejado de los valores sugeridos.

3.6 NÚMERO DE FROUDE

Para el cálculo del número de Froude de la Tabla 3.6, se utilizaron los datos de los calados y las velocidades en la garganta calculadas anteriormente, esto se aprecia en el Anexo 6.

TABLA 3.6 NÚMERO DE FROUDE

Caudal (l/s)	Número de Froude		
	Antes de la garganta	En la garganta	Después de la garganta
20,67	0,18	0,93	2,28
30,17	0,18	0,93	2,44
46,09	0,18	0,82	1,8

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

Con la observación de los valores obtenidos, se comprueba que para todos los caudales, el flujo de agua presenta tres regímenes: subcrítico, antes de la garganta, con un número de Froude menor a 1; crítico, en la garganta, donde el número de Froude es cercano a 1, y supercrítico, después de la garganta, con números de Froude mayores a 1, de acuerdo a la teoría expuesta en el Capítulo I.

3.7 TIEMPOS DE RETENCIÓN DEL CLORURO DE SODIO EN LOS DIFERENTES ENSAYOS

Se calculan diferentes tiempos de retención para el cloruro de sodio, dependiendo del punto de inyección de la solución y del punto de monitoreo de las muestras, para esto se utilizan los datos de las alturas del agua en el aforador de la Tabla 3.1, y el detalle del cálculo puede verse en el Anexo 6.

TABLA 3.7 TIEMPOS DE RETENCIÓN DEL CLORURO DE SODIO

Caudal (l/s)	Tiempos de retención del cloruro de sodio (s)			
	Punto de monitoreo 1		Punto de monitoreo 2	
	Punto de inyección A	Punto de inyección B	Punto de inyección A	Punto de inyección B
20,67	0,485	0,314	0,878	0,706
30,17	0,432	0,279	0,752	0,599
46,09	0,406	0,271	0,692	0,557

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

Observando los resultados en la Tabla 3.7, se puede notar que a medida que aumenta el caudal, los tiempos de retención del cloruro de sodio disminuyen, esto es lógico, puesto que a mayor caudal, las velocidades son mayores en cada sección del aforador, y el tiempo que el trazador permanece en el mismo es menor.

Todos los valores de los tiempos de retención obtenidos son menores a un segundo, tiempo que según lo expuesto en el Capítulo I, es el máximo tiempo en el que la mezcla rápida debe darse para lograr una total dispersión de las sustancias coagulantes en la masa de agua, por lo que en los ensayos realizados, estos tiempos resultan adecuados.

3.8 ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA

Los siguientes resultados de la Tabla 3.8, corresponden a los ensayos de mezcla rápida realizados, cuya metodología se describió en el Capítulo II. En primer lugar, se presenta la descripción de las pruebas, la concentración inicial de cloruro de sodio del agua circulante para cada una y la concentración media que se esperaría tener luego de la inyección de la solución de cloruro de sodio en

cada prueba, calculada mediante el balance de masa que puede apreciarse en el Anexo 6.

TABLA 3.8 CONCENTRACIONES INICIALES Y MEDIAS PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS

Q₁ = 20,67 l/s			
PUNTO DE MUESTREO 1			
No. Prueba	DESCRIPCIÓN	Concentración inicial (g/l)	Concentración media (g/l)
P1	Punto de inyección A sobre el flujo	0,342	0,582
P2	Punto de inyección A fondo contracorriente	0,345	0,586
P3	Punto de inyección A fondo hacia arriba	0,352	0,593
P4	Punto de inyección B sobre el flujo	0,356	0,596
P5	Punto de inyección B fondo contracorriente	0,368	0,608
P6	Punto de inyección B fondo hacia arriba	0,369	0,609
PUNTO DE MUESTREO 2			
No. Prueba	DESCRIPCIÓN	Concentración inicial (g/l)	Concentración media (g/l)
P19	Punto de inyección A sobre el flujo	0,398	0,638
P20	Punto de inyección A fondo contracorriente	0,400	0,640
P21	Punto de inyección A fondo hacia arriba	0,401	0,642
P22	Punto de inyección B sobre el flujo	0,404	0,645
P23	Punto de inyección B fondo contracorriente	0,404	0,645
P24	Punto de inyección B fondo hacia arriba	0,406	0,646
Q₂ = 30,17 l/s			
PUNTO DE MUESTREO 1			
No. Prueba	DESCRIPCIÓN	Concentración inicial (g/l)	Concentración media (g/l)
P7	Punto de inyección A sobre el flujo	0,366	0,531
P8	Punto de inyección A fondo contracorriente	0,371	0,536
P9	Punto de inyección A fondo hacia arriba	0,379	0,544
P10	Punto de inyección B sobre el flujo	0,379	0,543
P11	Punto de inyección B fondo contracorriente	0,383	0,548
P12	Punto de inyección B fondo hacia arriba	0,387	0,552
PUNTO DE MUESTREO 2			
No. Prueba	DESCRIPCIÓN	Concentración inicial (g/l)	Concentración media (g/l)
P25	Punto de inyección A sobre el flujo	0,406	0,570
P26	Punto de inyección A fondo contracorriente	0,408	0,573

TABLA 3.8 CONTINUACIÓN

P27	Punto de inyección A fondo hacia arriba	0,410	0,575
P28	Punto de inyección B sobre el flujo	0,411	0,576
P29	Punto de inyección B fondo contracorriente	0,412	0,577
P30	Punto de inyección B fondo hacia arriba	0,413	0,578
Q₃ = 46,09 l/s			
PUNTO DE MUESTREO 1			
No. Prueba	DESCRIPCIÓN	Concentración inicial (g/l)	Concentración media (g/l)
P13	Punto de inyección A sobre el flujo	0,391	0,499
P14	Punto de inyección A fondo contracorriente	0,391	0,499
P15	Punto de inyección A fondo hacia arriba	0,393	0,501
P16	Punto de inyección B sobre el flujo	0,391	0,499
P17	Punto de inyección B fondo contracorriente	0,393	0,501
P18	Punto de inyección B fondo hacia arriba	0,395	0,503
PUNTO DE MUESTREO 2			
No. Prueba	DESCRIPCIÓN	Concentración inicial (g/l)	Concentración media (g/l)
P31	Punto de inyección A sobre el flujo	0,412	0,520
P32	Punto de inyección A fondo contracorriente	0,414	0,522
P33	Punto de inyección A fondo hacia arriba	0,416	0,524
P34	Punto de inyección B sobre el flujo	0,418	0,526
P35	Punto de inyección B fondo contracorriente	0,416	0,524
P36	Punto de inyección B fondo hacia arriba	0,418	0,526

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

A continuación se presentan los resultados de las concentraciones de cloruro de sodio en las muestras obtenidas en cada ensayo, su diferencia con la concentración media y su porcentaje de desviación, los valores de desviación presentados en las tablas con color azul, corresponden a aquellos valores que se encuentran por debajo de la concentración media; los valores presentados con negro, son aquellos que se encuentran sobre la concentración media.

TABLA 3.9 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q₁ = 20.67 L/SY EL PUNTO DE MUESTREO 1

Punto	P1 Punto de inyección A sobre el flujo			P2 Punto de inyección A fondo contracorriente			P3 Punto de inyección A fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,166	-0,416	71,478	1,017	0,431	73,576	0,771	0,178	29,348
2	0,165	-0,417	71,638	0,921	0,335	57,144	0,722	0,129	21,337
3	0,165	-0,417	71,638	0,969	0,333	65,346	1,024	0,431	72,561
4	0,165	-0,417	71,638	1,081	0,495	84,523	1,080	0,487	82,176
5	0,344	-0,238	40,948	0,844	0,258	44,056	0,577	-0,076	-2,647
6	0,195	-0,387	66,581	0,277	-0,309	52,793	0,267	-0,326	56,017
7	0,168	-0,414	71,077	0,384	-0,202	34,393	0,507	-0,086	14,444
8	0,165	-0,417	71,638	0,877	0,291	49,686	1,040	0,447	75,436
9	0,639	0,057	9,821	1,034	0,448	76,510	0,559	-0,034	-5,175
10	0,355	-0,227	38,955	0,192	-0,394	67,288	0,177	-0,476	70,196
11	0,239	-0,343	58,851	0,232	-0,354	60,493	0,315	-0,278	46,308
12	0,187	-0,395	67,906	0,760	0,174	29,748	1,312	0,719	121,303
Punto	P4 Punto de inyección B sobre el flujo			P5 Punto de inyección B fondo contracorriente			P6 Punto de inyección B fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,186	-0,410	68,817	0,536	-0,072	11,778	0,511	-0,038	-16,141
2	0,168	-0,428	71,756	0,524	-0,084	13,872	0,565	-0,044	-7,222
3	0,165	-0,431	72,304	0,906	0,298	48,958	0,743	0,134	22,040
4	0,165	-0,431	72,304	1,308	0,700	115,174	1,194	0,555	95,031
5	0,187	-0,409	68,660	0,588	-0,020	3,303	0,705	0,056	15,757
6	0,165	-0,431	72,304	0,342	-0,266	43,785	0,191	-0,478	68,600
7	0,165	-0,431	72,304	0,625	0,017	2,736	0,286	-0,323	52,990
8	0,165	-0,431	72,304	1,247	0,639	107,037	1,068	0,459	75,378
9	0,423	-0,173	28,949	0,422	-0,186	30,547	0,949	0,340	55,344
10	0,225	-0,371	62,297	0,189	-0,419	68,933	0,188	-0,471	69,137
11	0,223	-0,373	62,612	0,329	-0,279	45,886	0,194	-0,475	68,177
12	0,226	-0,370	62,022	0,850	0,242	39,774	1,083	0,474	77,341

FUENTE Y ELABORACION: María Belén Aldás.

TABLA 3.10 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ L/S Y EL PUNTO DE MUESTREO 1

P o n t o N o	P7 Punto de inyección A sobre el flujo			P8 Punto de inyección A fondo			P9 Punto de inyección A fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	C,186	-0,345	64,912	0,486	-0,050	9,368	0,727	0,183	33,663
2	C,165	-0,366	68,870	0,323	-0,213	39,764	0,410	-0,134	24,564
3	C,165	-0,366	68,914	0,460	-0,076	14,186	0,723	0,179	32,946
4	C,165	-0,366	68,914	0,928	0,392	73,142	1,154	0,610	112,047
5	C,171	-0,360	67,815	0,668	0,132	24,720	0,722	0,178	32,766
6	C,171	-0,360	67,771	0,186	-0,350	65,283	0,195	-0,349	64,117
7	C,166	-0,365	68,782	0,308	-0,228	42,584	0,236	-0,308	56,623
8	C,165	-0,366	68,914	0,824	0,288	53,689	0,860	0,316	58,028
9	C,182	-0,349	65,704	0,653	0,117	21,914	0,935	0,391	71,960
10	C,174	-0,357	67,244	0,182	-0,354	66,111	0,192	-0,352	64,676
11	C,165	-0,366	68,914	0,297	-0,239	44,608	0,220	-0,324	59,469
12	C,165	-0,366	68,870	0,785	0,249	46,461	0,690	0,146	26,905
13	C,150	0,619	116,481	0,191	-0,345	64,280	0,249	-0,295	54,249
14	C,256	-0,275	51,846	0,179	-0,357	66,678	0,181	-0,363	66,781
15	C,181	-0,350	65,968	0,396	-0,140	26,056	0,231	-0,313	57,486
16	C,296	-0,235	44,264	0,705	0,169	31,476	0,416	-0,128	23,470
P o n t o N o	P10 Punto de inyección B sobre el flujo			P11 Punto de inyección B fondo			P12 Punto de inyección B fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	C,181	-0,363	66,781	0,527	-0,021	3,872	0,884	0,332	60,112
2	C,165	-0,379	69,657	0,382	-0,166	30,363	0,563	0,011	1,922
3	C,165	-0,379	69,614	0,451	-0,097	17,765	0,738	0,186	33,758
4	C,165	-0,379	69,614	0,925	0,377	68,809	1,118	0,566	102,468
5	C,165	-0,379	69,657	0,767	0,219	40,039	1,050	0,498	90,229
6	C,167	-0,377	69,357	0,229	-0,319	58,181	0,191	-0,361	65,357
7	C,165	-0,379	69,657	0,422	-0,126	23,073	0,262	-0,290	52,571
8	C,165	-0,379	69,657	1,021	0,473	86,385	0,864	0,312	56,540
9	C,173	-0,371	68,112	0,434	-0,114	20,725	0,981	0,429	77,644

TABLA 3.10 CONTINUACIÓN

10	0,166	-0,370	60,435	0,100	-0,360	57,100	0,174	-0,370	60,447
11	0,165	-0,379	69,657	0,321	-0,227	41,428	0,194	-0,358	64,891
12	0,165	-0,379	69,614	1,016	0,468	85,340	0,651	0,099	17,853
13	1,025	0,481	88,488	0,196	-0,352	54,251	0,237	-0,315	57,039
14	0,205	-0,339	62,310	0,105	-0,383	59,878	0,104	-0,388	70,350
15	0,168	-0,375	69,185	0,216	-0,332	50,663	0,185	-0,367	66,501
16	0,273	-0,271	49,834	0,453	-0,095	17,416	0,324	-0,228	41,296

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás.

TABLA 3.11 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q₃ = 46.09 L/S Y EL PUNTO DE MUESTREO 1

Z	P13 Punto de inyección A sobre el flujo			P14 Punto de inyección A fondo			P15 Punto de inyección A fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,166	-0,333	66,640	0,540	0,141	28,331	0,848	0,347	69,282
2	0,165	-0,334	66,874	0,484	-0,015	3,032	0,523	0,022	4,379
3	0,165	-0,334	66,921	0,600	0,101	20,140	0,617	0,116	23,230
4	0,165	-0,334	66,874	0,825	0,325	65,281	0,993	0,492	98,108
5	0,165	-0,334	66,074	0,506	0,107	21,447	0,900	0,400	97,512
6	0,166	-0,333	66,827	0,258	-0,241	48,287	0,204	-0,297	59,309
7	0,165	-0,334	66,874	0,452	-0,047	9,451	0,250	-0,251	50,182
8	0,165	-0,334	66,874	0,670	0,171	34,308	0,763	0,262	52,245
9	0,172	-0,327	65,517	0,305	-0,134	20,901	0,769	0,208	53,907
10	0,166	0,333	66,827	0,221	0,278	66,626	0,185	0,316	63,044
11	0,165	-0,334	66,874	0,392	-0,107	21,383	0,223	-0,278	55,428
12	0,165	-0,334	66,921	0,494	-0,005	0,921	0,680	0,179	35,711
13	0,461	-0,038	7,680	0,173	-0,325	65,424	0,178	-0,323	64,536
14	0,177	-0,322	64,581	0,197	-0,302	60,500	0,171	-0,330	65,841
15	0,165	-0,334	66,874	0,349	-0,150	30,082	0,262	-0,239	47,785

TABLA 3.11 CONTINUACION

P o n t o Z o n a	P16 Punto de inyección B sobre el flujo			P17 Punto de inyección B fondo			P18 Punto de inyección B fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
16	0,165	-0,334	66,874	0,465	-0,034	6,818	0,454	-0,047	9,335
17	0,750	0,251	50,313	0,170	-0,329	65,985	0,170	-0,331	66,121
18	0,187	-0,312	62,474	0,182	-0,317	63,552	0,165	-0,336	67,006
19	0,174	-0,325	65,096	0,255	-0,244	48,899	0,185	-0,316	63,137
20	0,530	0,031	6,193	0,268	-0,231	46,213	0,167	-0,334	66,727
21	1,248	0,749	150,180	0,166	-0,333	66,827	0,165	-0,336	67,053
22	0,527	0,028	5,616	0,171	-0,328	65,798	0,165	-0,336	67,006
23	0,197	-0,302	60,553	0,184	-0,315	63,130	0,165	-0,336	67,006
24	1,168	0,669	134,145	0,165	-0,334	66,921	0,165	-0,336	67,053
				P17 Punto de inyección B fondo					
				Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,168	-0,331	66,313	2,523	2,022	403,504	0,982	0,479	95,196
2	0,166	-0,333	66,827	1,784	1,283	256,085	0,647	0,144	28,563
3	0,166	-0,333	66,827	1,897	1,396	278,632	0,656	0,153	30,346
4	0,166	-0,333	66,827	2,675	2,174	433,893	0,620	0,117	23,220
5	0,166	-0,333	66,827	2,771	2,270	453,191	1,181	0,678	134,836
6	0,165	-0,334	66,874	0,962	0,461	91,963	0,261	-0,242	48,044
7	0,165	-0,334	66,874	1,239	0,738	147,313	0,360	-0,143	28,519
8	0,165	-0,334	66,874	2,599	2,098	418,665	0,591	0,088	17,553
9	0,165	-0,334	66,874	1,455	0,954	190,499	0,927	0,424	84,255
10	0,165	-0,334	66,874	0,691	0,190	37,991	0,180	-0,323	64,213
11	0,166	-0,333	66,827	0,950	0,449	89,587	0,227	-0,276	54,906
12	0,165	-0,334	66,874	2,359	1,858	370,942	0,387	-0,116	23,000
13	0,244	-0,255	51,159	0,688	0,187	37,263	0,210	-0,293	58,261
14	0,165	-0,334	66,874	0,624	0,123	24,485	0,165	-0,338	67,184
15	0,165	-0,334	66,874	0,731	0,230	45,865	0,186	-0,317	63,052
16	0,165	-0,334	66,874	1,700	1,199	239,321	0,177	-0,326	64,817
17	0,470	-0,029	5,764	0,635	0,134	26,659	0,165	-0,338	67,184
18	0,182	-0,317	63,552	0,621	0,120	23,905	0,165	-0,338	67,184

□

TABLA 3.11 CONTINUACIÓN

19	0,165	-0,334	66,874	0,655	0,154	30,721	0,165	-0,338	67,184
20	0,303	-0,196	39,225	0,886	0,385	76,854	0,165	-0,338	67,137
21	1,184	0,685	137,324	0,625	0,124	24,775	0,165	-0,338	67,184
22	0,372	-0,127	25,475	0,618	0,117	23,326	0,165	-0,338	67,137
23	0,182	-0,317	63,505	0,627	0,126	25,064	0,165	-0,338	67,137
24	1,092	0,593	118,750	0,625	0,124	24,775	0,165	-0,338	67,137

FUENTE Y ELABORACION: Maria Belén Aldás.

TABLA 3.12 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q₁ = 20,67 L/S Y EL PUNTO DE MUESTREO 2

N ^o de Z	P19 Punto de inyección A sobre el flujo			P20 Punto de inyección A fondo contracorriente			P21 Punto de inyección A fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,634	-0,004	0,577	0,413	-0,227	35,433	0,357	-0,285	44,328
2	0,215	-0,423	66,285	0,333	-0,307	48,038	0,423	-0,219	34,151
3	0,186	-0,452	70,797	0,504	-0,135	21,326	0,636	-0,006	1,008
4	0,226	-0,412	64,632	0,834	0,194	30,365	0,885	0,243	37,859
5	0,872	0,234	36,714	0,384	-0,255	39,965	0,361	-0,281	43,737
6	0,468	-0,170	20,707	0,249	-0,391	61,075	0,243	-0,399	62,221
7	0,376	-0,262	41,005	0,430	-0,210	32,825	0,360	-0,282	43,995
8	0,387	-0,251	39,330	0,706	0,065	10,302	0,646	0,004	0,576
9	0,737	0,099	15,537	0,455	-0,185	28,952	0,464	-0,178	27,760
10	0,692	0,054	8,474	0,550	-0,090	14,085	0,562	-0,080	12,441
11	0,344	-0,294	46,020	0,454	-0,175	27,455	0,589	-0,053	8,274
12	0,287	-0,351	55,053	0,827	0,187	29,213	1,018	0,376	58,591

TABLA 3.12 CONTINUACIÓN

Punto de Muestreo	P22 Punto de inyección B sobre el flujo			P23 Punto de inyección B fondo			P24 Punto de inyección B fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,400	-0,245	37,926	0,593	-0,052	8,027	0,565	-0,081	12,462
2	0,205	-0,440	68,285	0,306	-0,339	52,506	0,331	-0,315	48,740
3	0,194	-0,451	69,954	0,367	-0,278	43,043	0,406	-0,240	37,212
4	0,223	-0,422	66,416	0,550	-0,095	14,677	0,548	-0,098	15,144
5	0,786	0,141	21,786	0,583	-0,062	9,561	0,626	-0,020	3,120
6	0,553	-0,092	14,266	0,302	-0,343	53,128	0,214	-0,432	66,884
7	0,545	-0,100	15,497	0,326	-0,319	49,393	0,224	-0,422	65,251
8	0,420	-0,225	34,900	0,388	-0,257	39,915	0,480	-0,166	25,653
9	0,530	-0,115	17,807	0,672	0,027	4,208	0,764	0,118	18,227
10	0,395	-0,250	38,773	0,627	-0,018	2,744	0,556	-0,090	13,915
11	0,358	-0,287	44,513	0,549	-0,096	14,826	0,586	-0,060	9,327
12	0,284	-0,361	56,015	0,529	-0,116	18,031	0,710	0,064	9,842

FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás.

TABLA 3.13 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q₂ = 30,17 L/S Y EL PUNTO DE MUESTREO 2

Punto de Muestreo	P25 Punto de inyección A sobre el flujo			P26 Punto de inyección A fondo			P27 Punto de inyección A fondo hacia arriba		
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	% desviación
1	0,600	0,030	5,218	0,297	-0,276	48,185	0,222	-0,353	61,328
2	0,262	-0,308	54,087	0,212	-0,361	62,965	0,196	-0,379	65,854
3	0,196	-0,374	65,637	0,273	-0,300	52,371	0,255	-0,320	55,664
4	0,179	-0,391	68,667	0,612	0,039	6,727	0,703	0,128	22,245
5	0,759	0,189	33,146	0,254	-0,319	55,754	0,249	-0,326	56,638
6	0,307	-0,263	46,220	0,190	-0,383	66,916	0,195	-0,380	66,139

TABLA 3.13 CONTINUACION

Punto de Muestreo	P28 Punto de inyección B sobre el flujo		P20 Punto de inyección D fondo		P30 Punto de inyección E fondo		P30 Punto de inyección F fondo		P30 Punto de inyección G fondo	
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)
7	0,261	-0,309	0,273	-0,300	0,273	-0,300	0,273	-0,300	0,244	-0,331
8	0,278	-0,292	0,496	-0,077	0,496	-0,077	0,496	-0,077	0,524	-0,051
9	0,761	0,191	0,329	-0,244	0,329	-0,244	0,329	-0,244	0,331	-0,244
10	0,381	-0,189	0,327	-0,245	0,327	-0,245	0,327	-0,245	0,452	-0,123
11	0,445	-0,125	0,371	-0,202	0,371	-0,202	0,371	-0,202	0,458	-0,117
12	0,306	-0,264	0,516	-0,057	0,516	-0,057	0,516	-0,057	0,555	0,020
Punto de Muestreo	P28 Punto de inyección B sobre el flujo		P20 Punto de inyección D fondo		P30 Punto de inyección E fondo		P30 Punto de inyección F fondo		P30 Punto de inyección G fondo	
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)
1	0,353	-0,218	0,278	-0,299	0,278	-0,299	0,278	-0,299	0,268	-0,310
2	0,182	-0,394	0,192	-0,385	0,192	-0,385	0,192	-0,385	0,153	-0,385
3	0,169	-0,407	0,227	-0,350	0,227	-0,350	0,227	-0,350	0,250	-0,348
4	0,165	-0,410	0,623	-0,061	0,623	-0,061	0,623	-0,061	0,656	0,063
5	0,577	0,001	0,264	-0,313	0,264	-0,313	0,264	-0,313	0,250	-0,298
6	0,263	-0,308	0,198	-0,379	0,198	-0,379	0,198	-0,379	0,156	-0,392
7	0,253	-0,323	0,272	-0,305	0,272	-0,305	0,272	-0,305	0,254	-0,324
8	0,205	-0,371	0,166	-0,122	0,166	-0,122	0,166	-0,122	0,414	0,134
9	0,517	-0,059	0,356	-0,221	0,356	-0,221	0,356	-0,221	0,363	-0,215
10	0,441	-0,135	0,369	-0,208	0,369	-0,208	0,369	-0,208	0,460	-0,118
11	0,350	-0,226	0,403	-0,174	0,403	-0,174	0,403	-0,174	0,334	-0,244
12	0,254	-0,322	0,510	-0,067	0,510	-0,067	0,510	-0,067	0,551	-0,027

FUENTE Y ELABORACION: Maria Belén Aldás.

TABLA 3.14 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL Q₃ = 46,09 L/S Y EL PUNTO DE MUESTREO 2

Punto de Muestreo	P31 Punto de inyección A sobre el flujo		P32 Punto de inyección A fondo		P33 Punto de inyección A fondo		P33 Punto de inyección A fondo	
	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)	Concentración (g/l)	Concentración - media (g/l)
1	0,311	-0,200	0,253	-0,260	0,253	-0,260	0,360	-0,215
2	0,183	-0,337	0,205	-0,316	0,205	-0,316	0,157	-0,327

TABLA 3.14 CONTINUACION

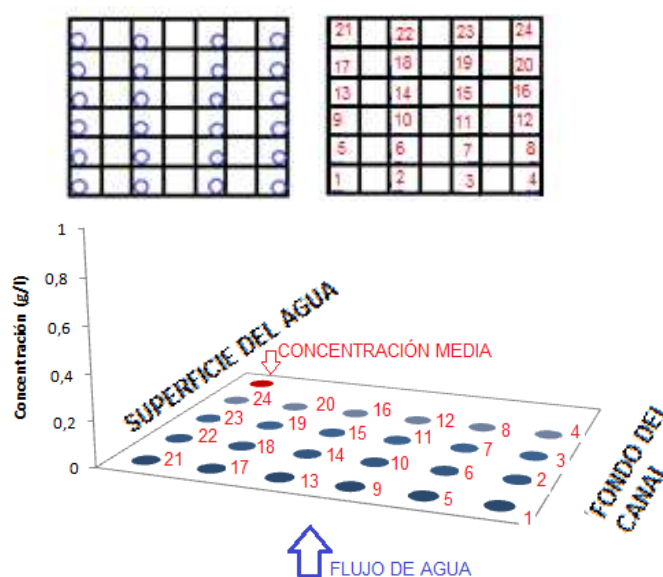
15	0,232	-0,244	46,333	0,941	0,417	79,563	0,321	-0,205	39,023
16	0,231	-0,295	56,031	1,150	0,626	119,421	0,380	-0,146	27,676

FUENTE Y ELABORACION: Maria Belen Aldás.

De los valores obtenidos en las Tablas 3.9 a 3.14, se infiere que sea la desviación sobre o bajo la concentración media, los valores son elevados, incluso se observan valores de porcentajes superiores al 100%, esto indica que los valores de las concentraciones presentan alta dispersión con respecto a la concentración media esperada, con esto, se evidencia que la mezcla no se realiza totalmente, es decir, no todos los puntos de la masa de agua reciben igual cantidad de trazador.

A continuación se presentan los resultados tabulados en forma gráfica. El plano horizontal de los gráficos representa el plano vertical en el que fueron tomadas las muestras para medir su concentración de cloruro de sodio, esto es, en los gráficos, el flujo de agua estaría circulando desde abajo hacia arriba, como se ve en la Figura 3.3.

FIGURA 3.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS EN LAS MALLAS

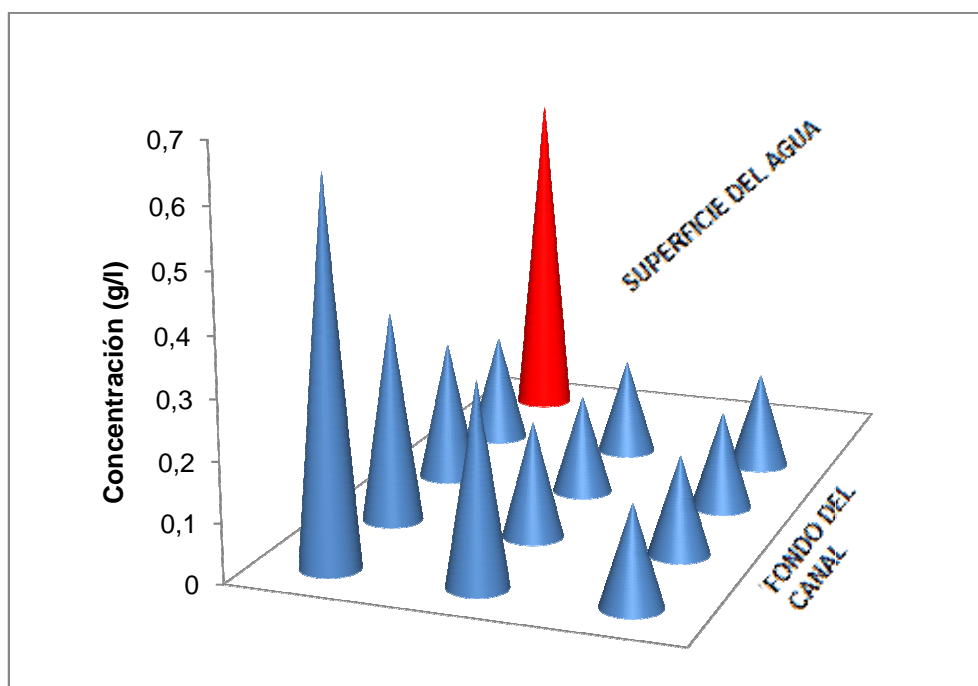


FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

Los picos representan la concentración de cloruro de sodio detectada en cada punto. El pico representado en rojo corresponde a la concentración media.

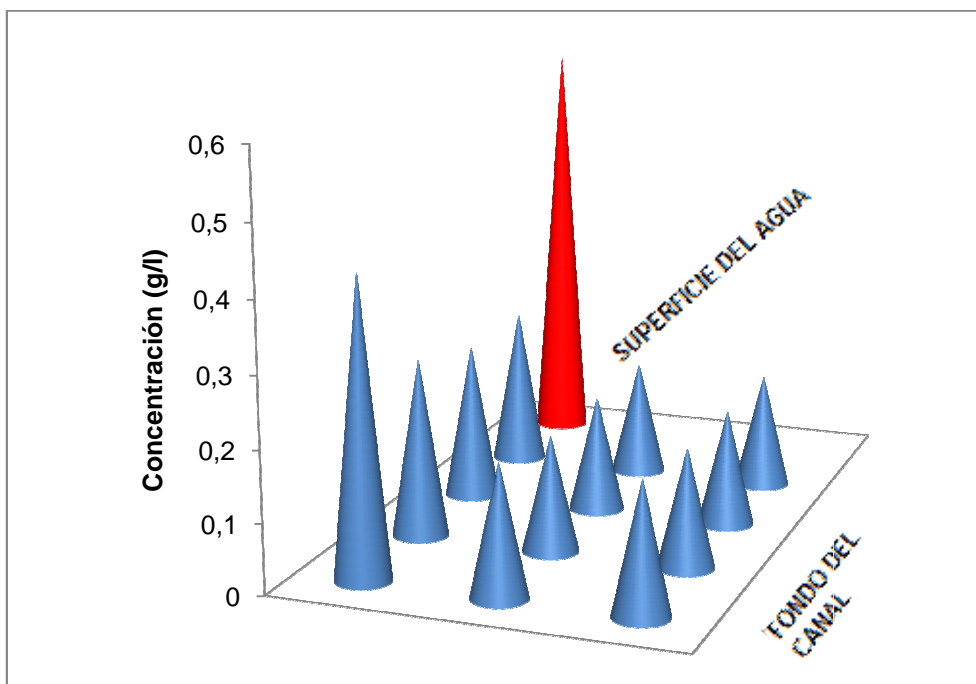
Se analizan primero los siguientes gráficos, correspondientes a los tres caudales, al punto de muestreo 1 y a la inyección de la solución de trazador sobre el flujo en los puntos A y B.

GRÁFICO 3.1 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO



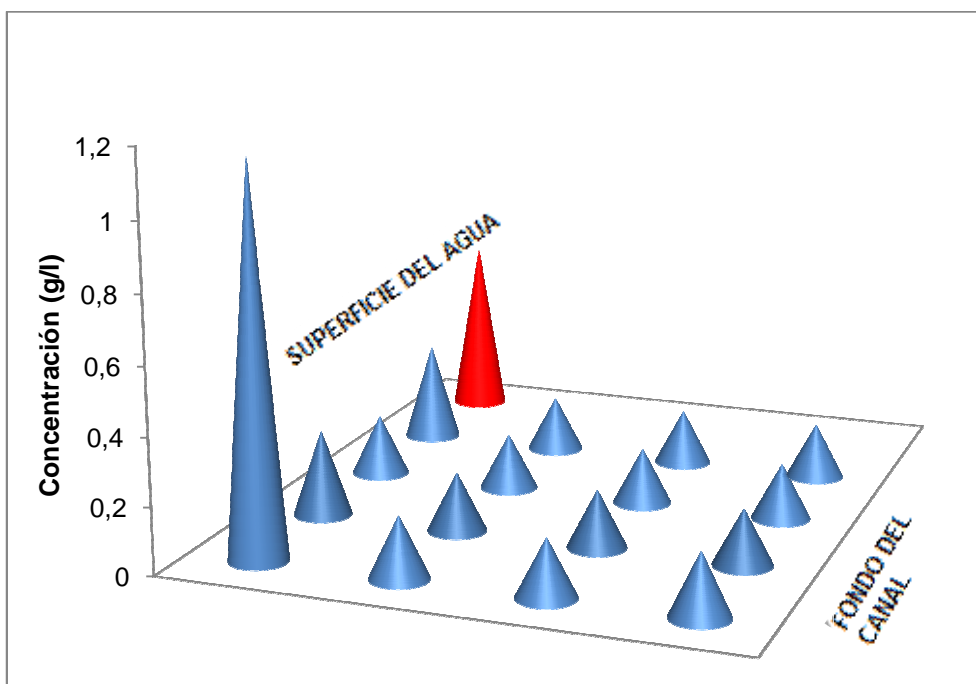
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.2 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO



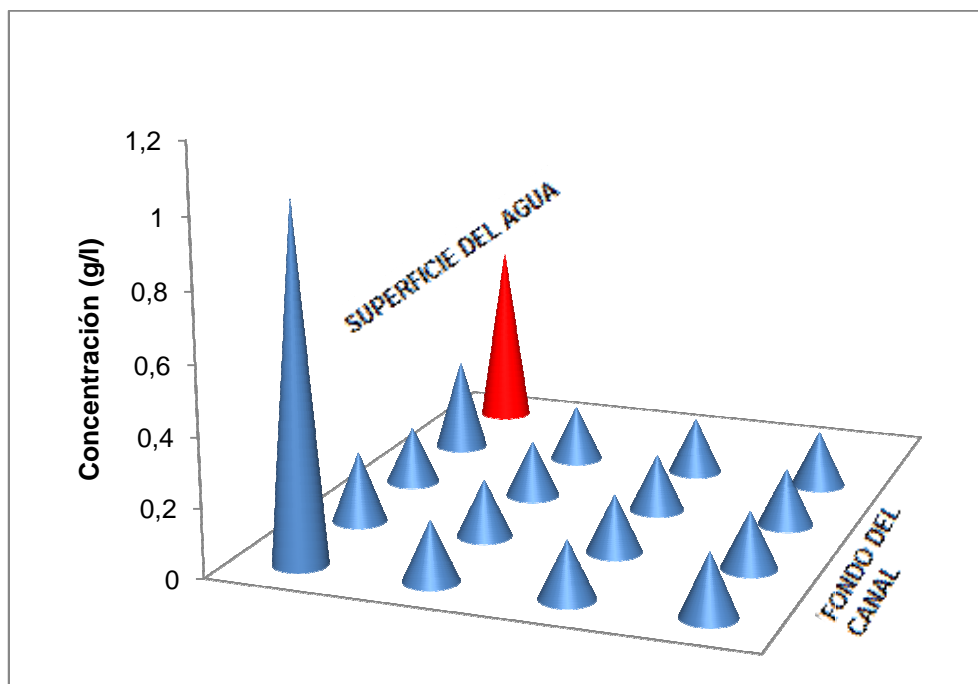
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.3 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO



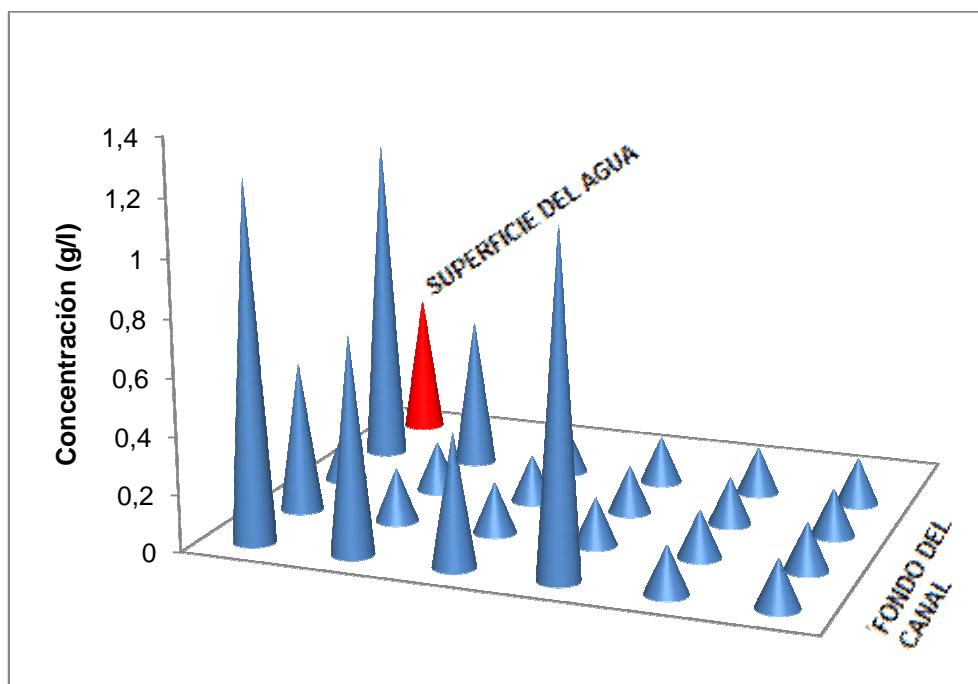
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.4 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO



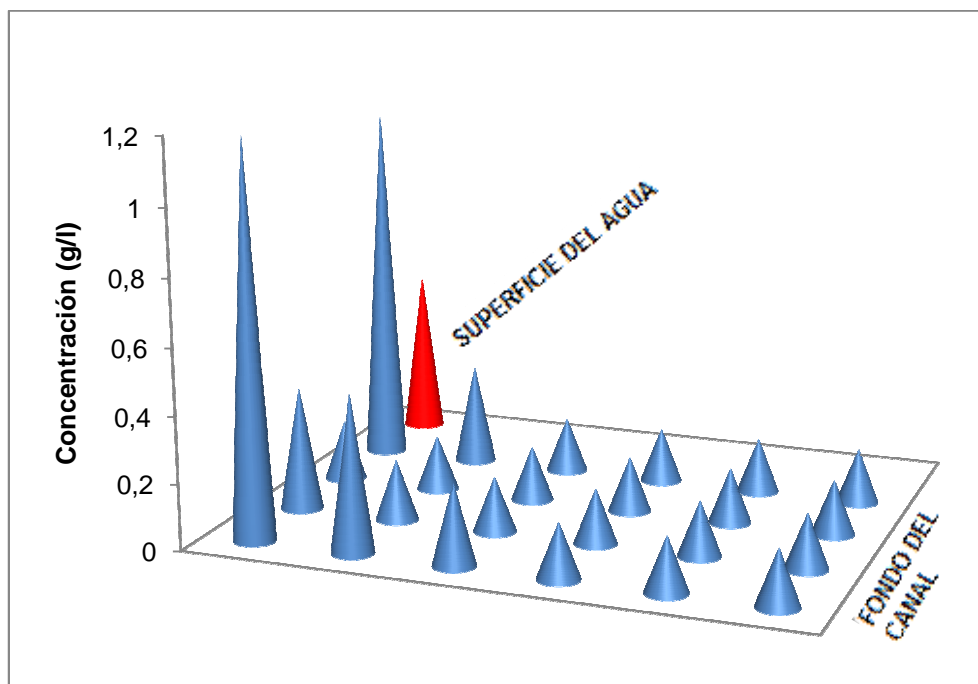
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.5 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.6 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

Se aprecia en los gráficos anteriores que los picos con mayores magnitudes, corresponden a los puntos en los que existe mayor concentración de trazador, y que éstos están ubicados en la parte superior de la sección transversal del flujo, es decir, en la zona cercana a la superficie del agua, que corresponde precisamente al sitio en el que se inyectó el trazador. En los puntos correspondientes a la zona del fondo del canal, se observa que el agua prácticamente no ha estado en contacto con el trazador, estos fenómenos pueden presentarse debido a que la velocidad con la que la solución de trazador fue inyectada (0,8 m/s en cada chorro, del Anexo 6) no fue lo suficientemente alta para lograr que la misma se distribuya hacia otras líneas de corriente más lejanas al punto de inyección y únicamente lo haga en las líneas de corriente cercanas.

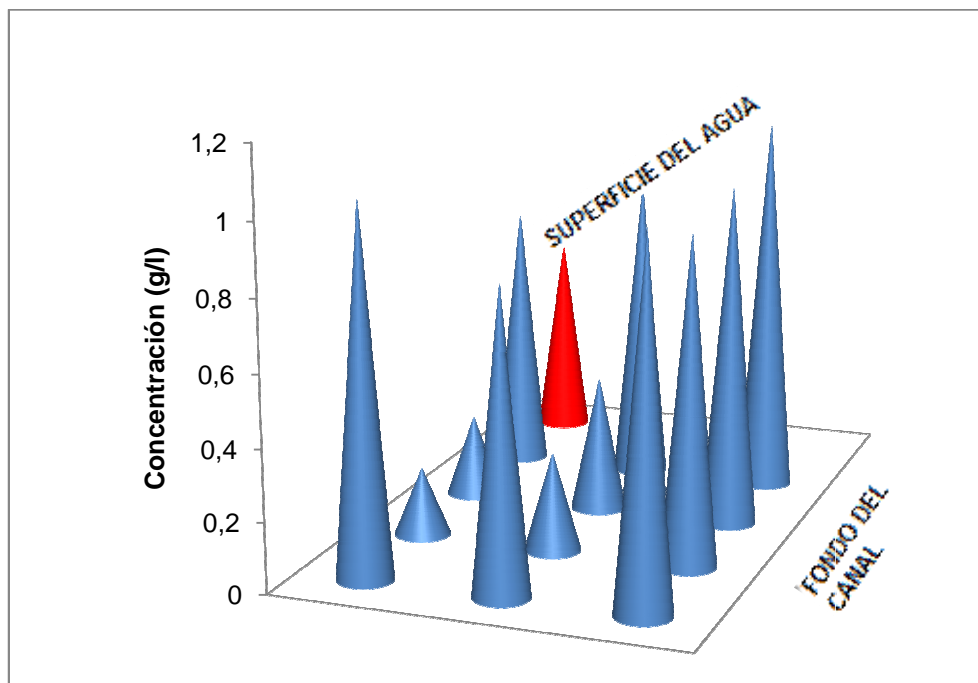
Se observa también que las concentraciones en los puntos monitoreados son menores a la concentración media esperada, esto confirma el hecho de que el trazador viaja únicamente por las líneas de corriente cercanas al punto de inyección, las mayores concentraciones estarían justamente en las líneas de corriente superficiales del agua, puntos en los que no existían puntos de muestreo, es decir, no existían mangueras para la toma de muestras, puesto que la malla metálica no permitía la colocación de las mismas.

En el caso del primer caudal, este hecho es más notorio: no se observan picos de alta magnitud en la zona superior, la última fila de mangueras para la toma de muestras se ubicó 1.5 cm más abajo de la superficie del agua, mientras que para los caudales medio y superior, la superficie se encontraba a 0.5 cm sobre la última fila de mangueras.

Puede apreciarse también que no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos con el punto de inyección antes de la garganta o en la misma, lo que indica que esta variable no tuvo influencia en la distribución del trazador en la masa de agua.

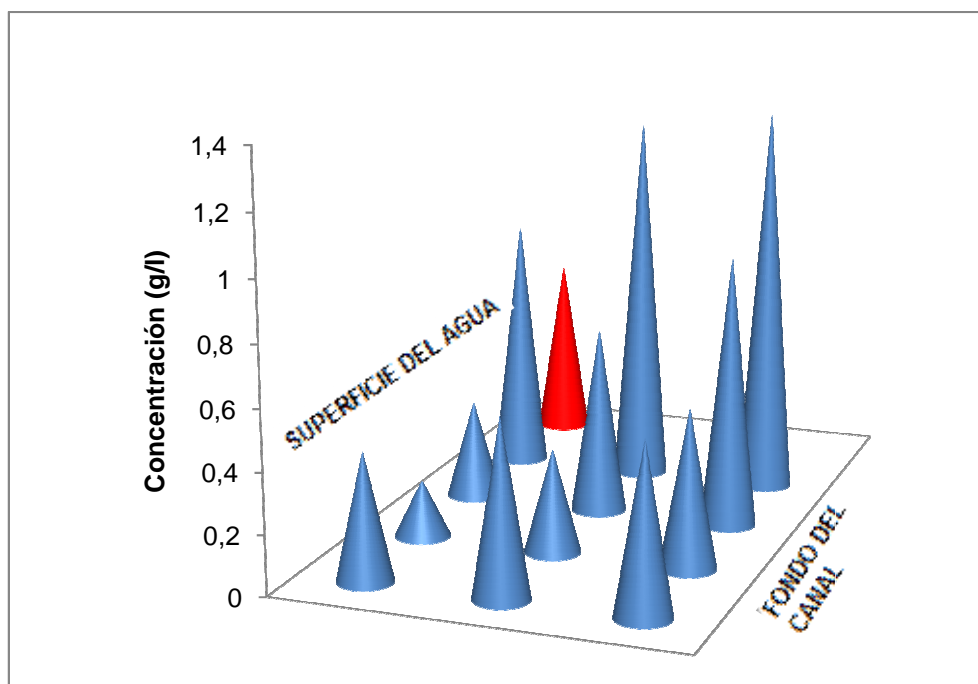
Se analizan a continuación los gráficos correspondientes a los tres caudales, al punto de muestreo 1 y a la inyección de la solución de trazador en los puntos A y B, en el fondo del canal en contracorriente.

GRÁFICO 3.7 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE



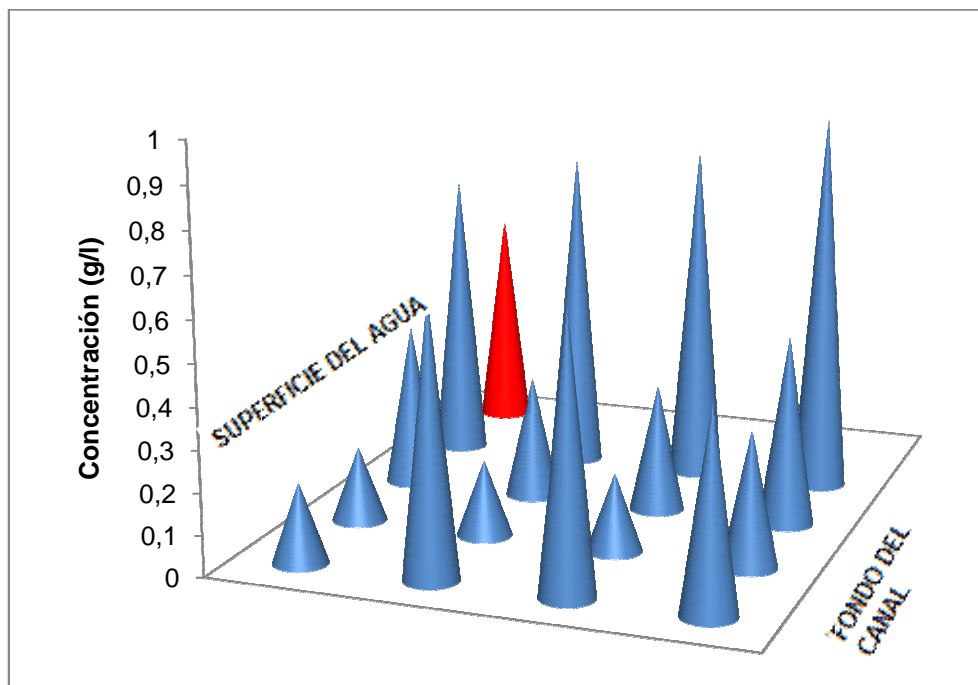
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.8 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE



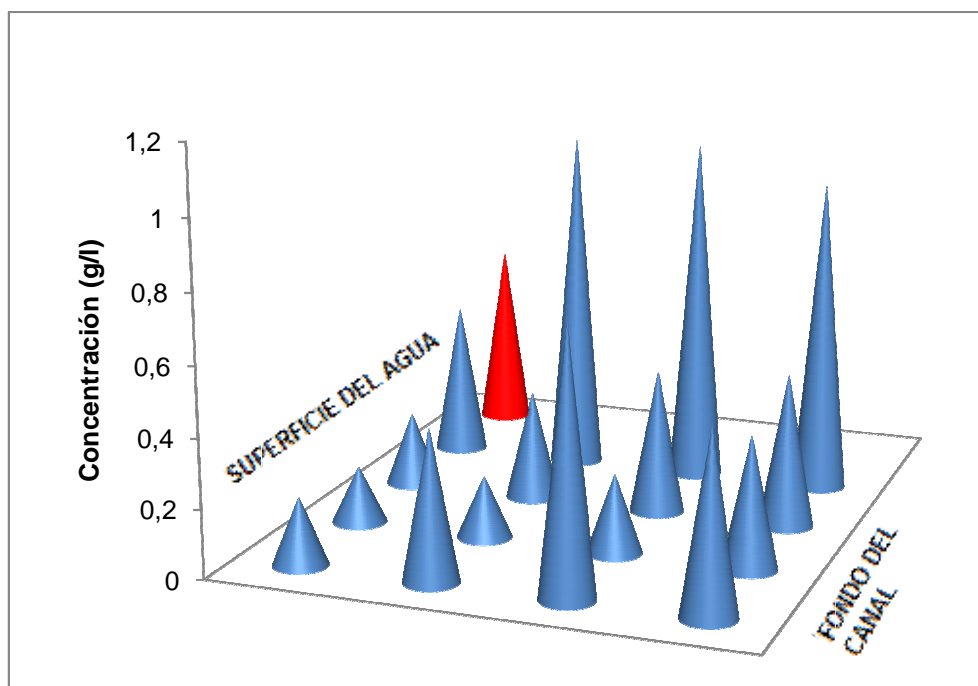
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.9 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE



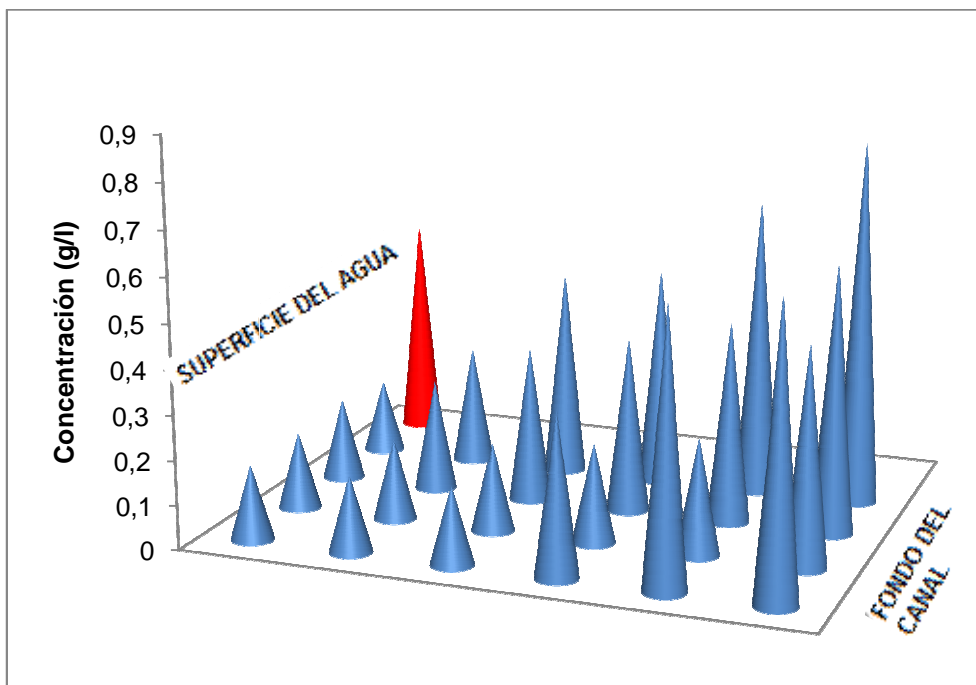
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.10 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE



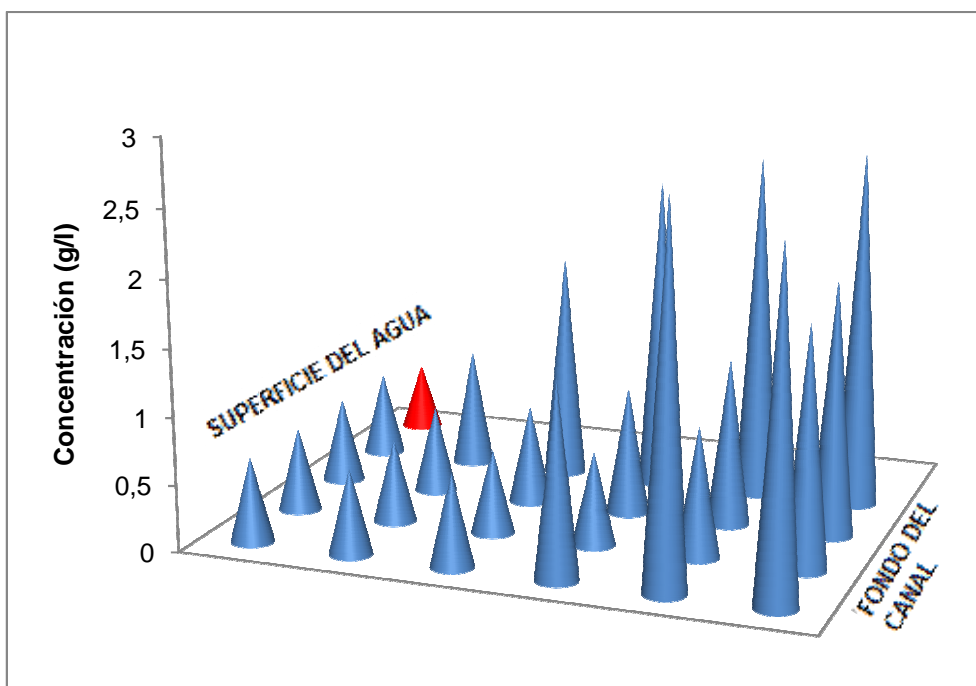
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.11 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.12 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

De la observación de los gráficos anteriores, puede notarse que los picos que representan las mayores concentraciones, se ubican en el fondo del canal, esto es, el trazador únicamente viaja por las líneas de corriente cercanas al punto de inyección, lo que puede deberse a la velocidad de inyección, como ya explicé anteriormente.

Para los tres caudales, se aprecia que en la zona cercana al contorno del flujo, es decir, en las zonas cercanas a las paredes y al fondo del canal, las concentraciones son mayores, esto puede deberse a que en dichas zonas, la velocidad del agua es menor que en el centro del flujo, debido a las fuerzas resistivas que se generan.

Se observa también que para el caudal máximo, la distribución es la más deficiente, se aprecia claramente que solamente en la mitad inferior de la sección transversal se obtienen concentraciones significativas, mientras que en la mitad superior, el agua prácticamente no recibe trazador, esto confirma el hecho de que la velocidad de inyección no es la adecuada para evitar que el trazador sea arrastrado por el agua circulante, a elevada velocidad (la mayor de todas las ensayadas), por las líneas de corriente cercanas al punto de inyección.

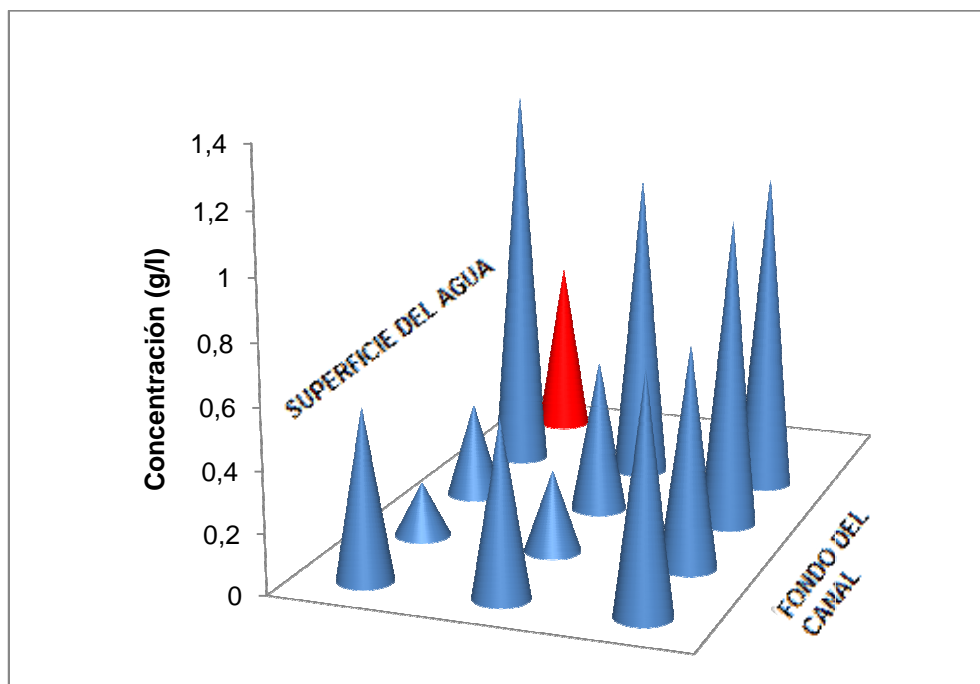
Como en los casos anteriores, no se aprecia diferencias entre los resultados con la variación del punto de inyección.

Comparando estos resultados con los primeros presentados, se observa una mejor distribución del trazador, puesto que se aprecian los picos de mayor magnitud ocupando mayor proporción del área transversal del flujo, esto indica

que cuando la inyección se hace dentro del flujo, se alcanza una mayor distribución que cuando se inyecta el trazador sobre la superficie del flujo.

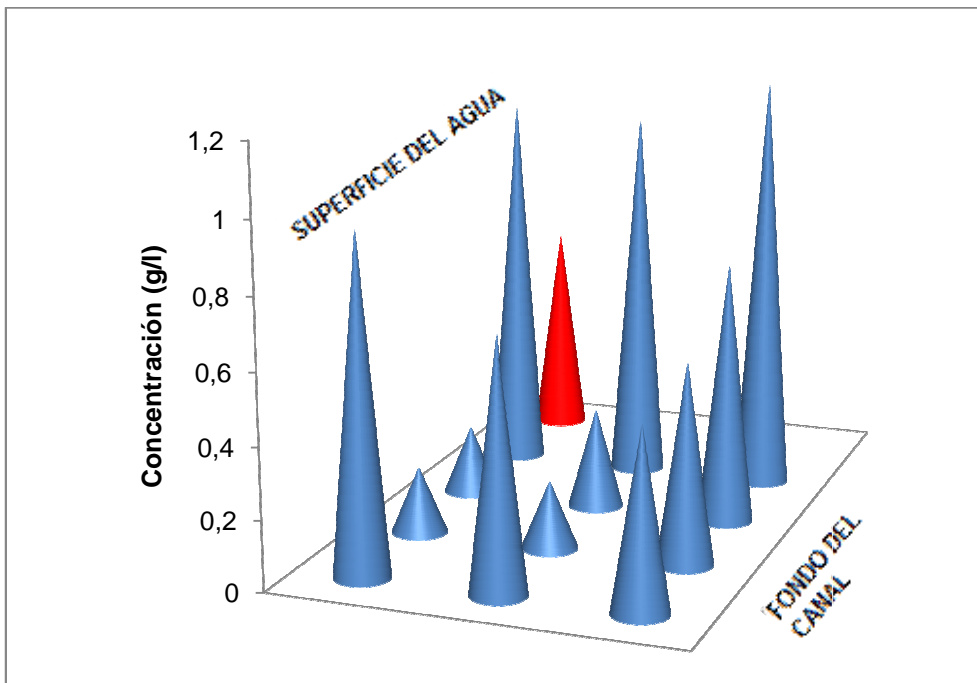
Se analizan a continuación los gráficos correspondientes a los tres caudales, al punto de muestreo 1 y a la inyección de la solución de trazador en los puntos A y B, en el fondo del canal hacia arriba.

GRÁFICO 3.13 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA



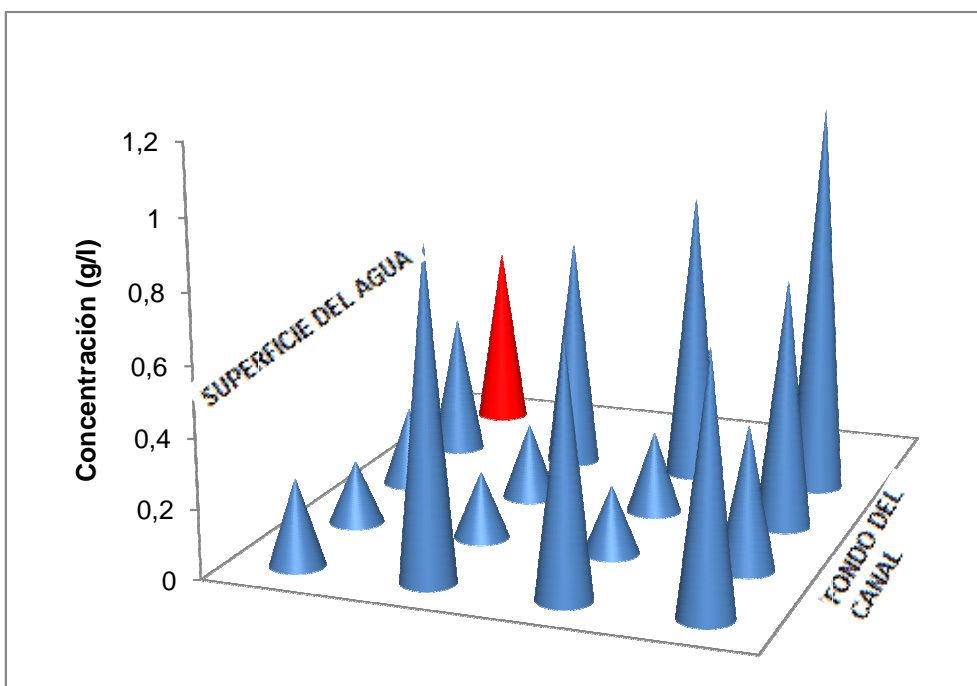
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.14 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA



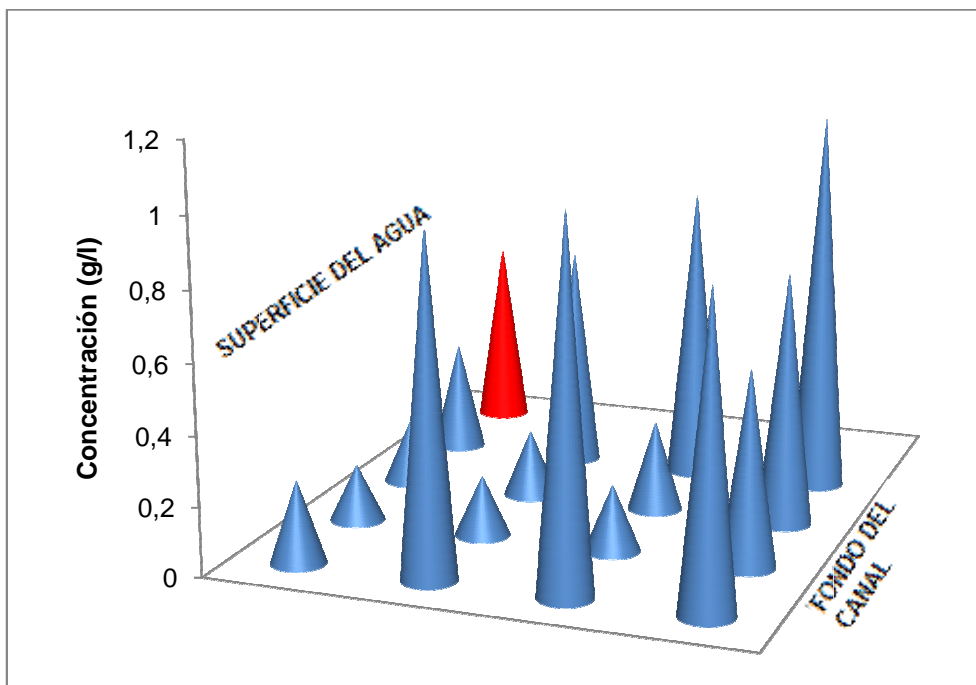
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.15 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA



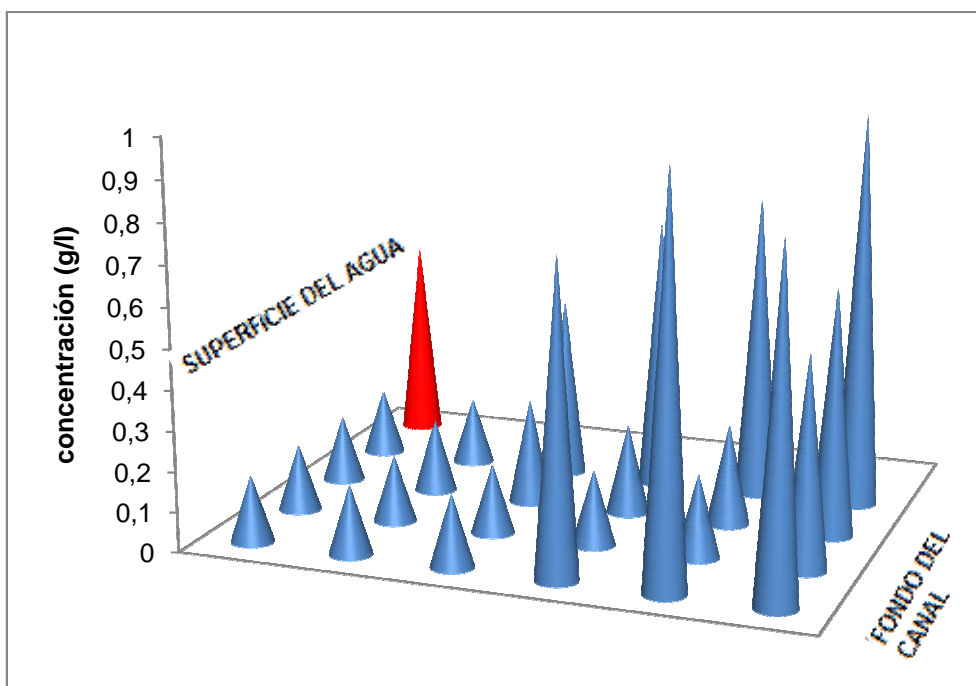
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.16 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA



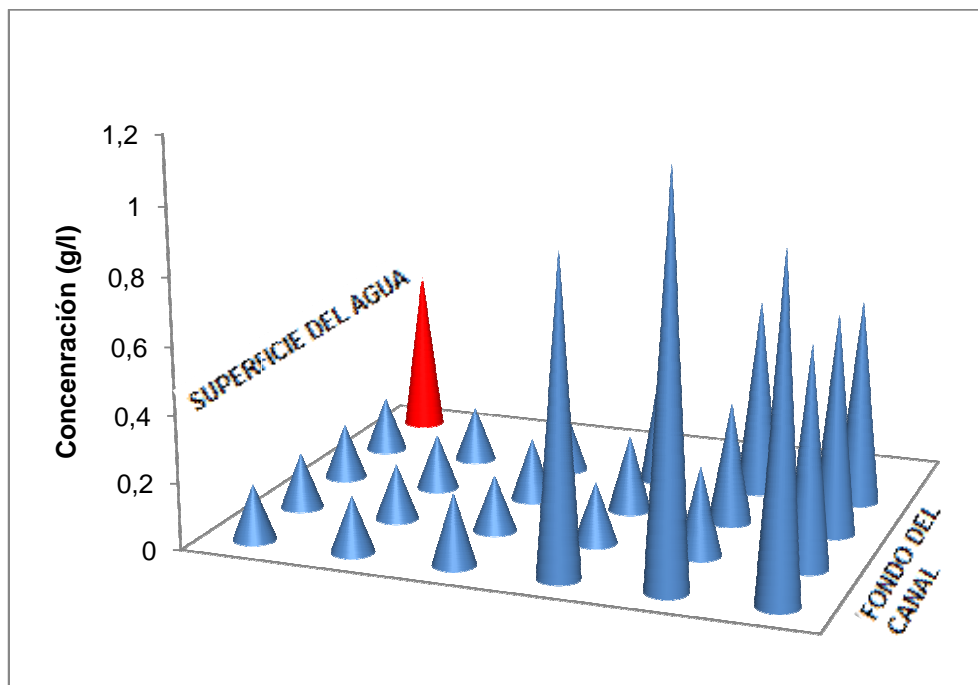
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.17 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.18 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 1. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

De la observación de los gráficos anteriores, puede verse que los picos que representan las mayores concentraciones, se ubican en el fondo del canal, como en los casos anteriores, el trazador únicamente viaja por las líneas de corriente cercanas al punto de inyección, lo que puede deberse a la velocidad de inyección, como ya se explicó anteriormente.

Para los tres caudales, también se aprecia que en la zona cercana al contorno del flujo, es decir, en las zonas cercanas a las paredes y al fondo del canal, las concentraciones son mayores, esto puede deberse a que en dichas zonas, la velocidad del agua es menor que en el centro del flujo, debido a las fuerzas resistivas que se generan.

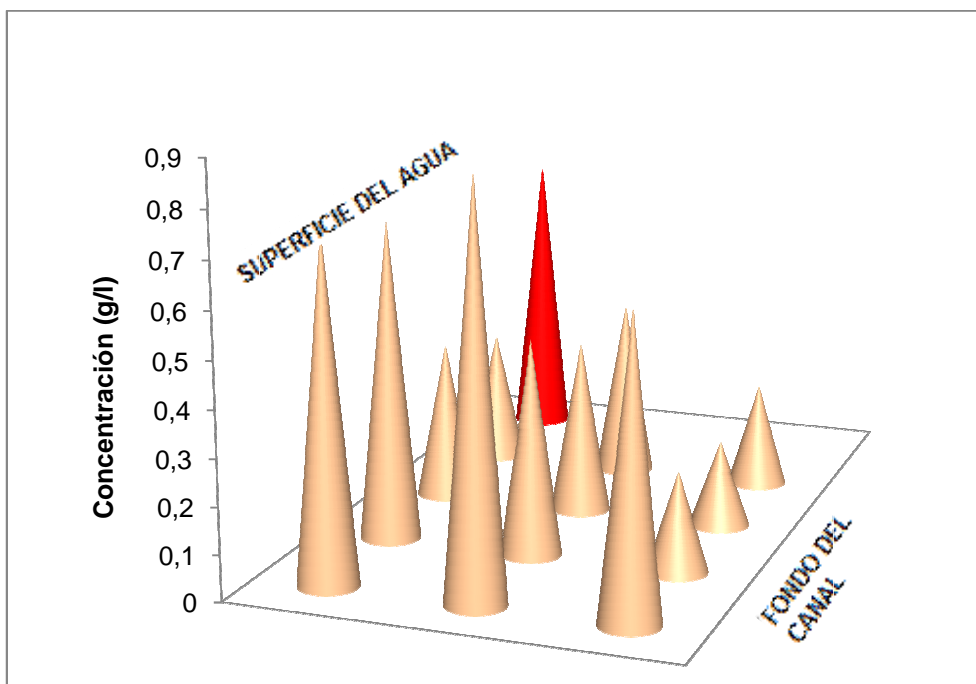
Se observa también que para el caudal máximo, la distribución es la más deficiente, se aprecia claramente que solamente en la mitad inferior de la sección transversal se obtienen concentraciones de trazador significativas, mientras que en la mitad superior, el agua prácticamente no recibe trazador, esto confirma el hecho de que la velocidad de inyección no es la adecuada para evitar que el trazador sea arrastrado por el agua circulante, a elevada velocidad (la mayor de todas las ensayadas), por las líneas de corriente cercanas al punto de inyección, como en los casos anteriores.

Como en los casos anteriores, no se aprecia diferencias entre los resultados con la variación del punto de inyección.

Comparando estos resultados con los anteriores presentados, se observa que la última distribución obtenida no supera la distribución observada en los anteriores, puesto que se aprecian mayores diferencias entre las magnitudes de los picos que cuando la inyección se hace en contracorriente.

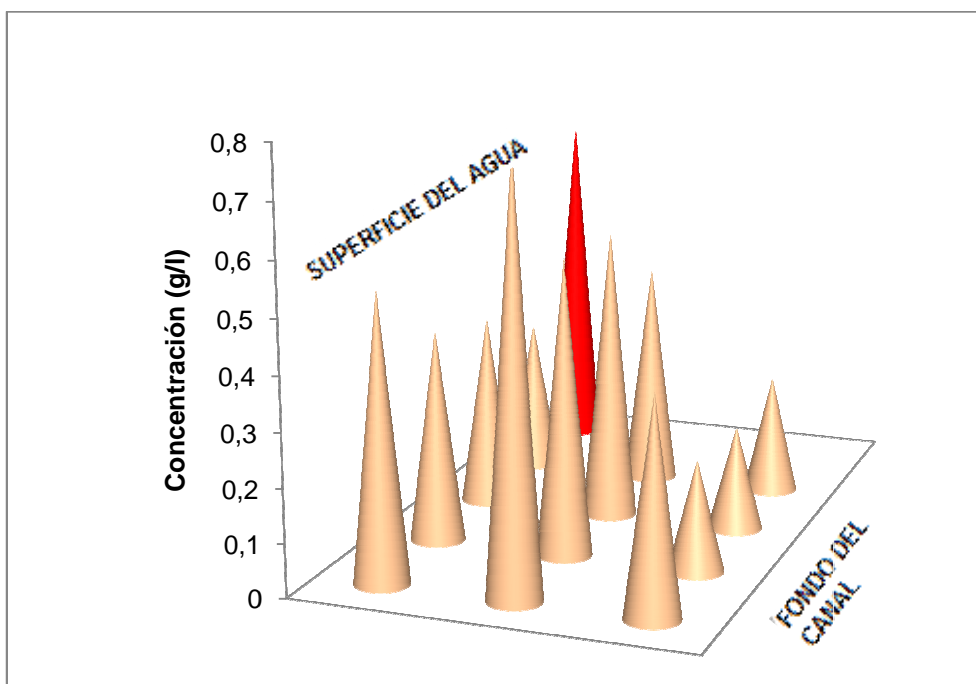
Finalmente, se analizan los gráficos correspondientes a los tres caudales, al punto de muestreo 2 y a la inyección de la solución de trazador sobre el flujo en los puntos A y B.

GRÁFICO 3.19 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO



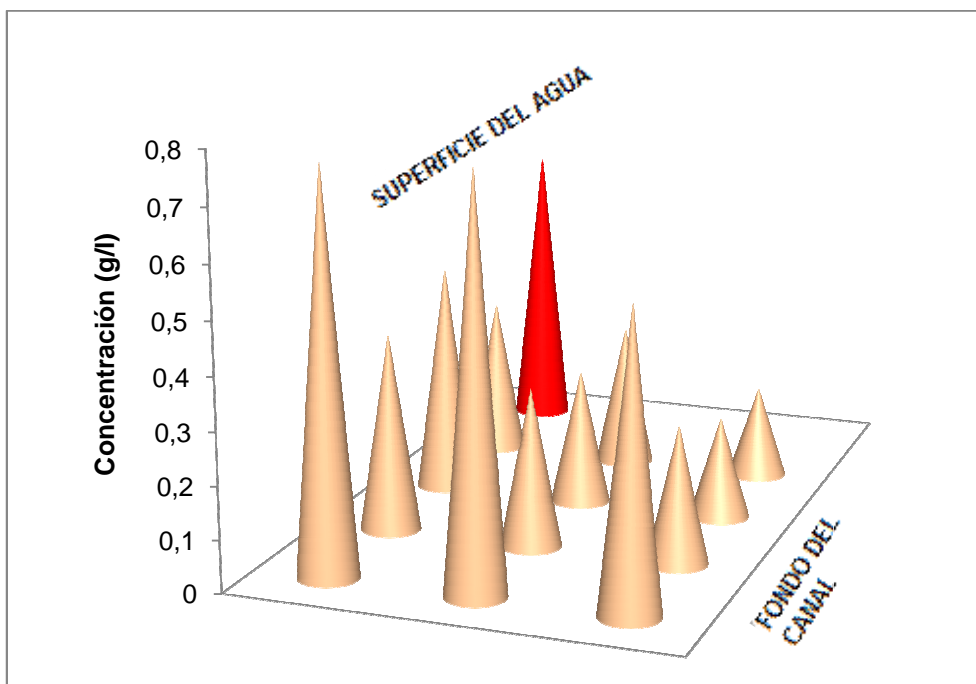
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.20 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO



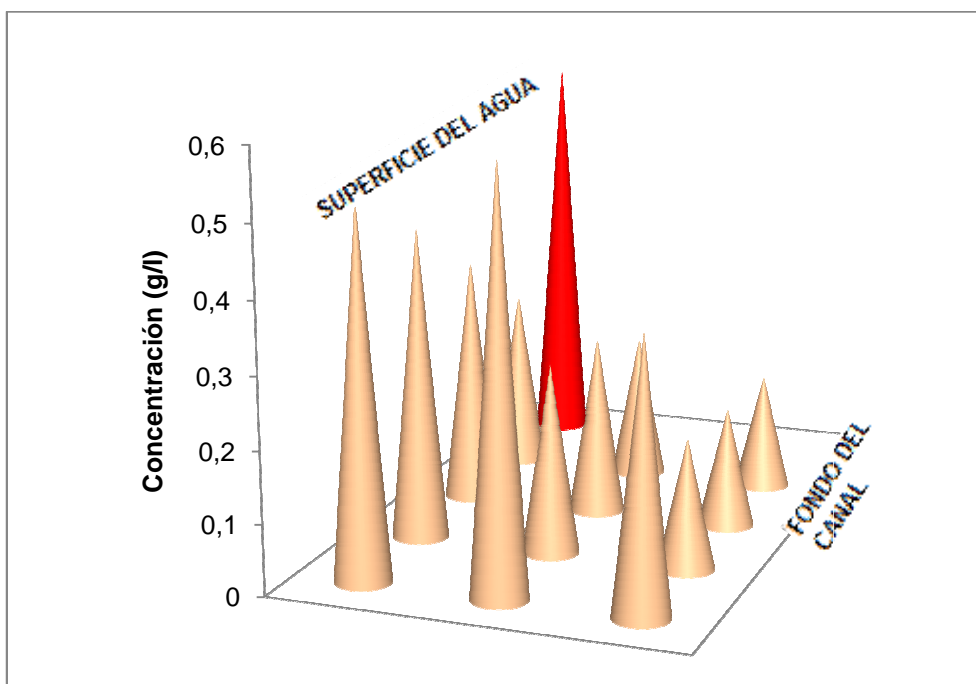
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.21 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO



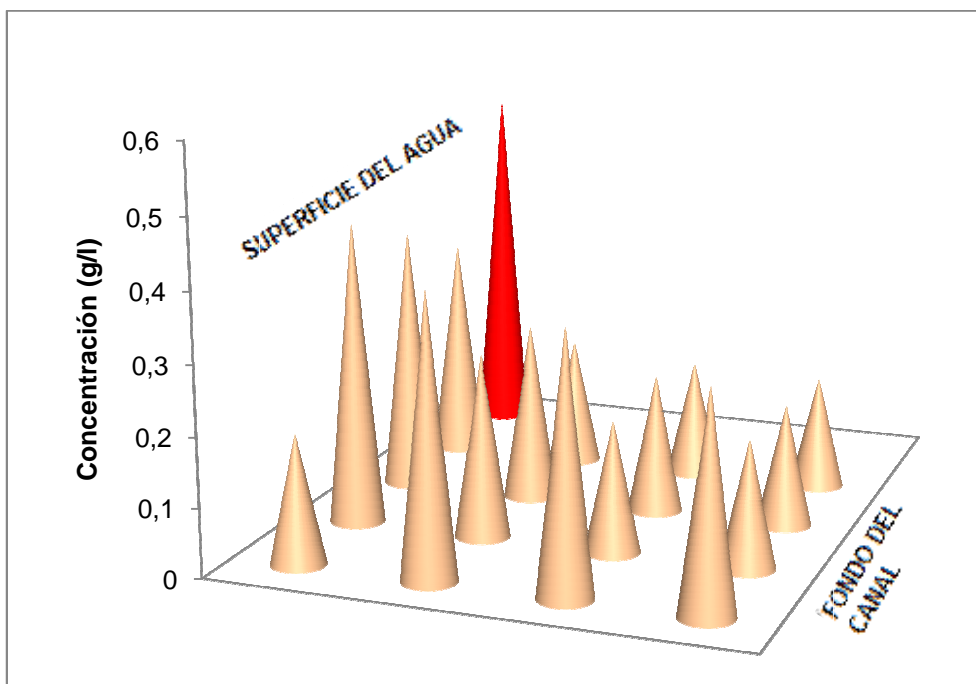
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.22 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO



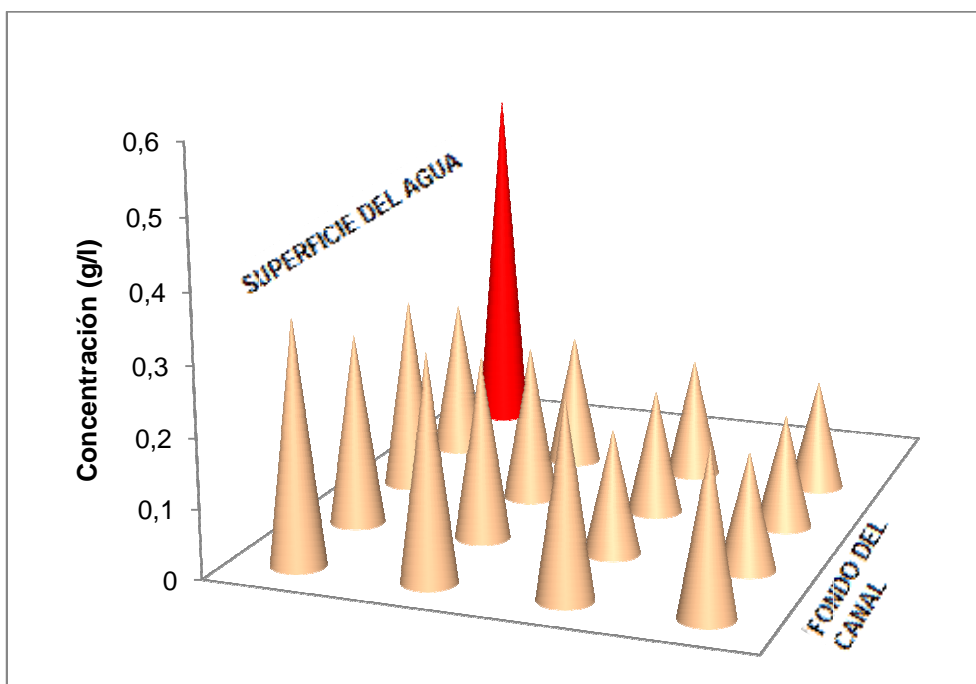
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.23 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A SOBRE EL FLUJO



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.24 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B SOBRE EL FLUJO



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

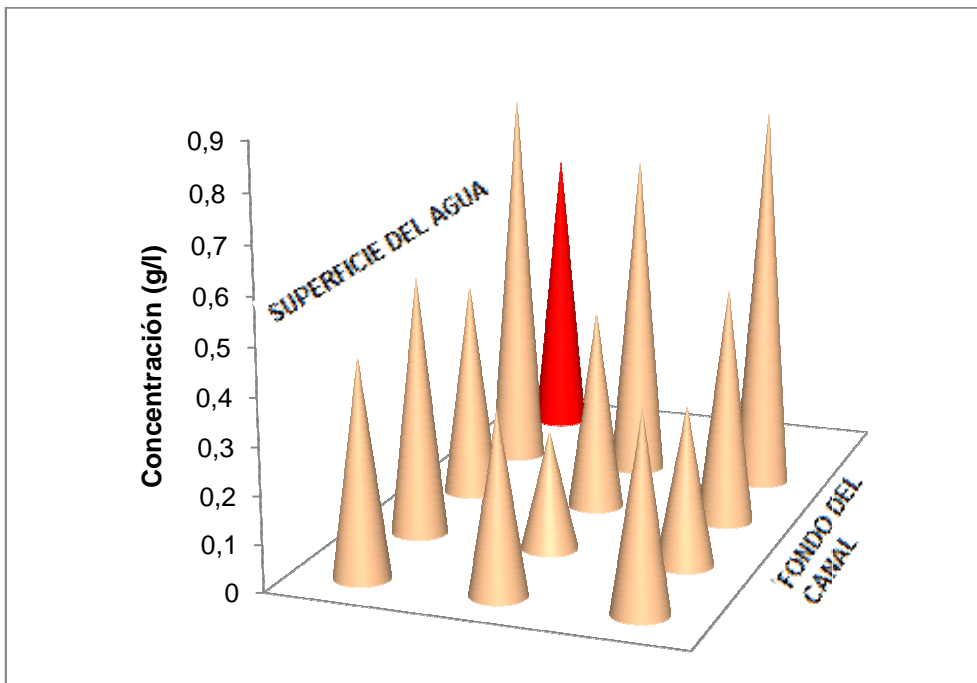
De la observación de los gráficos anteriores, se puede determinar, en general, que las mayores concentraciones de trazador se encuentran en la parte superior de la sección transversal del flujo, cercana a la zona de inyección, y puede notarse también que existe una tendencia a una mayor concentración del trazador en el lado izquierdo de la sección, esto puede deberse posiblemente a una falta de paralelismo total de las paredes del aforador.

Para los caudales mínimo y medio, se aprecia que la distribución es mejor comparada con la obtenida en el monitoreo en el punto1, a la salida de la sección divergente; mientras que para el caudal máximo, se observa que todas las concentraciones son menores a la media, ocurre entonces que la mayor cantidad de trazador está siendo transportado por líneas de corriente en la parte superior del flujo, donde no existían mangueras de toma de muestras, debido a que no fue posible su colocación en la malla de soporte, dado que la altura del agua se encontraba 1.5 cm sobre la última fila de mangueras.

No se aprecia diferencias ente los resultados obtenidos con la inyección antes de la garganta y en la garganta del aforador, para ambos casos, las distribuciones presentan similares tendencias.

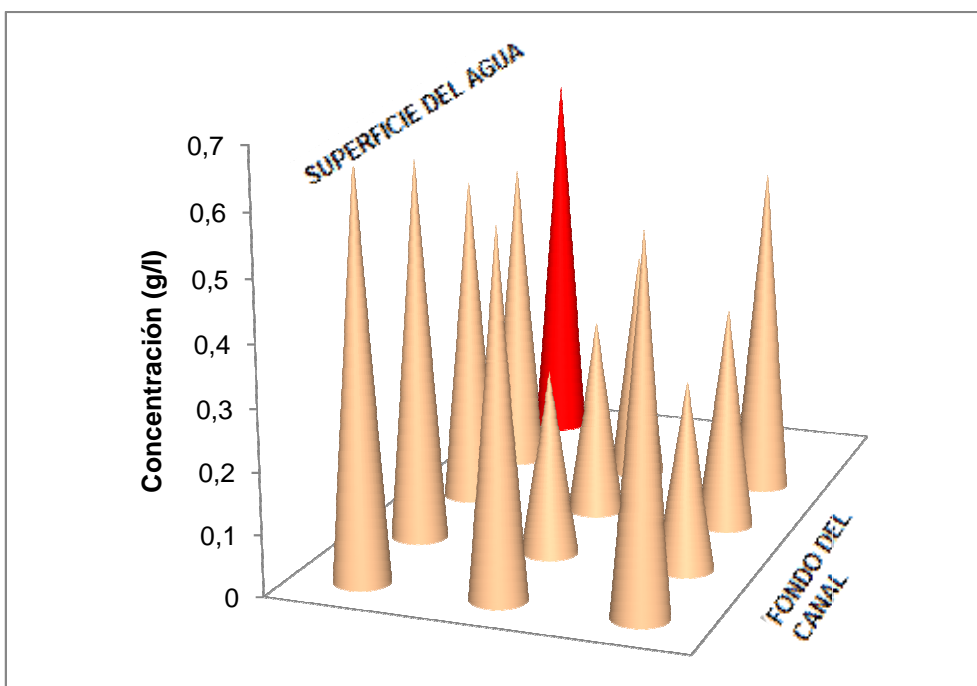
Se analizan los siguientes gráficos, correspondientes a los tres caudales, al punto de muestreo 2 y a la inyección de la solución de trazador en los puntos A y B, en el fondo del canal en contracorriente.

GRÁFICO 3.25 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE



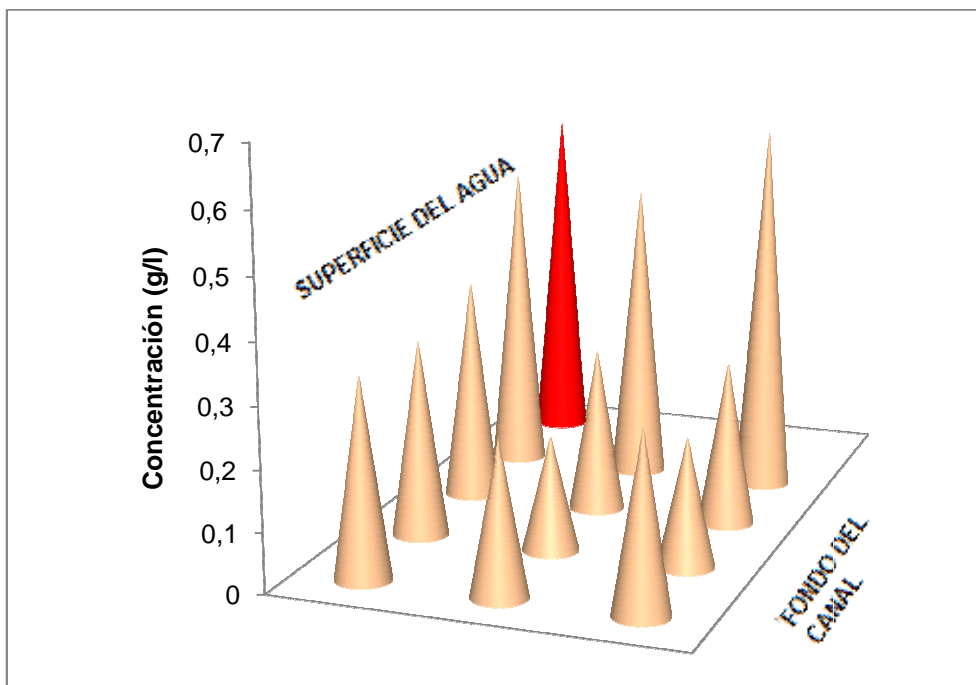
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.26 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE



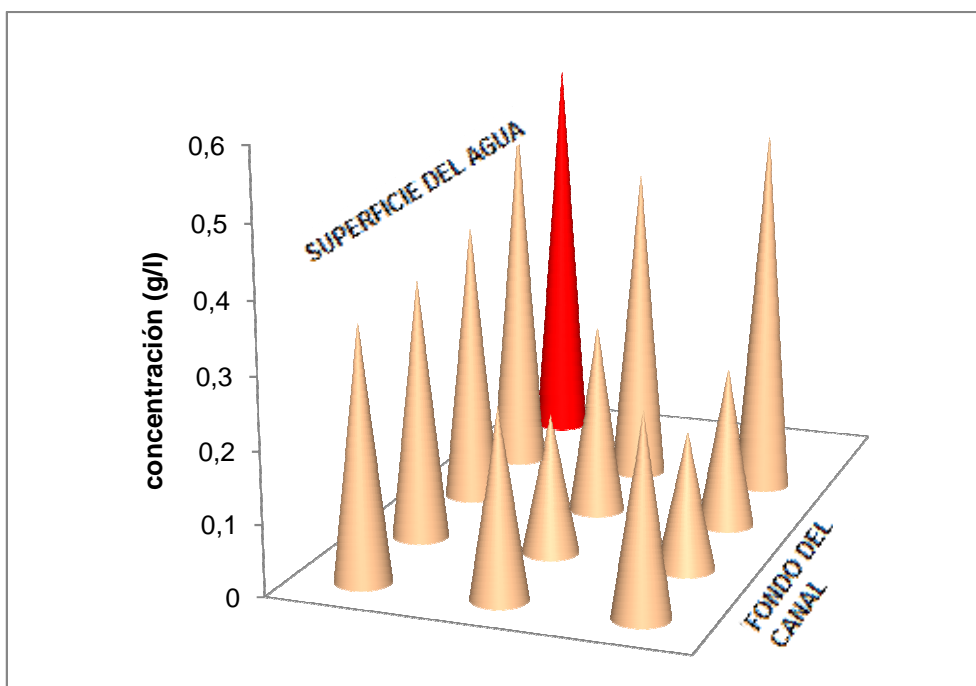
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.27 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE



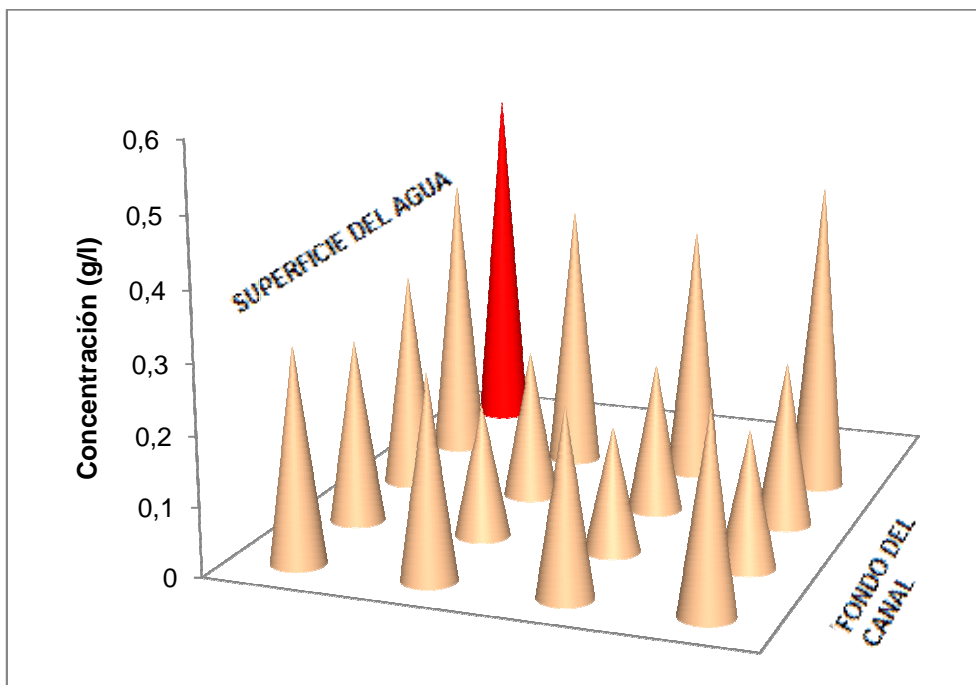
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.28 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE



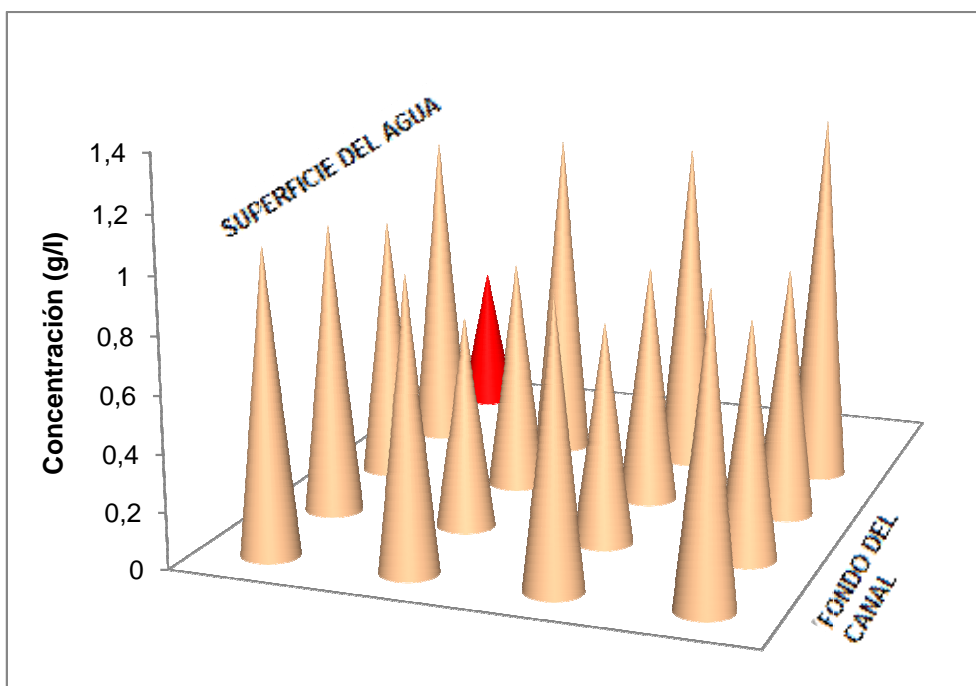
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.29 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO CONTRACORRIENTE



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.30 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO CONTRACORRIENTE



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

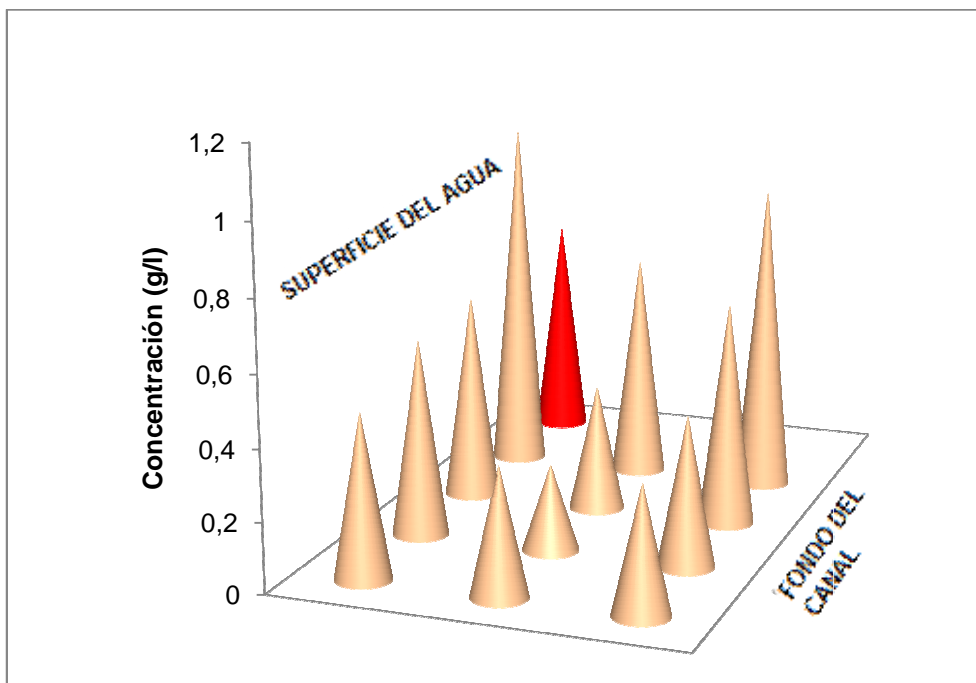
De la observación de los gráficos precedentes, se puede determinar que, a diferencia de los resultados del monitoreo en el punto 1, cuando la inyección se hace en el fondo del canal en contracorriente, la distribución es mucho más uniforme y no se aprecian mayores concentraciones del trazador solamente en la zona cercana al fondo, esto puede deberse a que se produce la mejor distribución del trazador cuando el agua sale de la sección divergente hacia la parte final del aforador, donde la sección del flujo sufre un ensanchamiento, generando turbulencia, que provoca la distribución del trazador.

Se aprecian mejores resultados cuando la inyección se hace en el fondo del canal en contracorriente y en la garganta del aforador, cuando se trabaja con el caudal máximo, esto se debe a que el trazador, una vez inyectado en el fondo, logra distribuirse de mejor manera en su paso por la garganta hasta alcanzar el final del aforador.

Se aprecia la tendencia a mayores concentraciones hacia el al lado derecho de la sección, debido a la falta de paralelismo en las paredes e irregularidades en la superficie de las mismas.

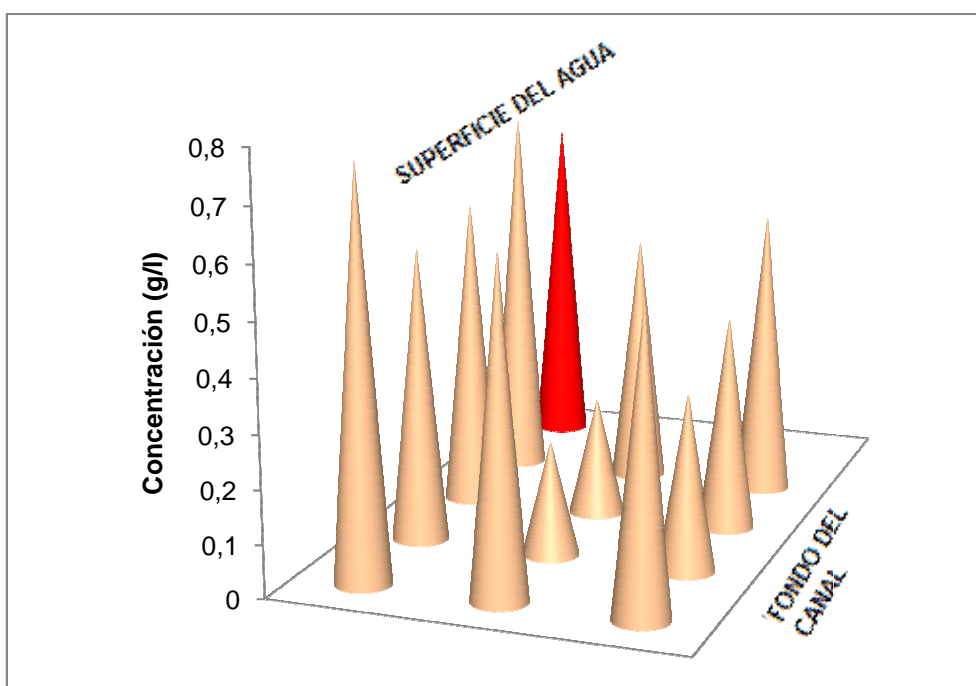
Se analizan a continuación los gráficos correspondientes a los tres caudales, al punto de muestreo 2 y a la inyección de la solución de trazador en los puntos A y B, en el fondo del canal hacia arriba.

GRÁFICO 3.31 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA



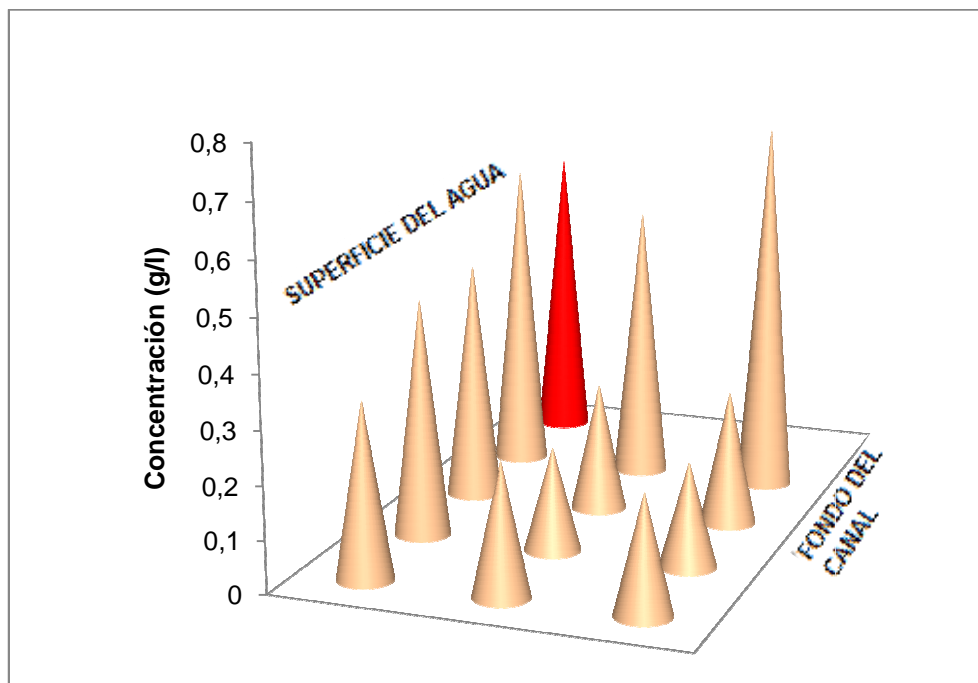
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.32 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_1 = 20,67$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA



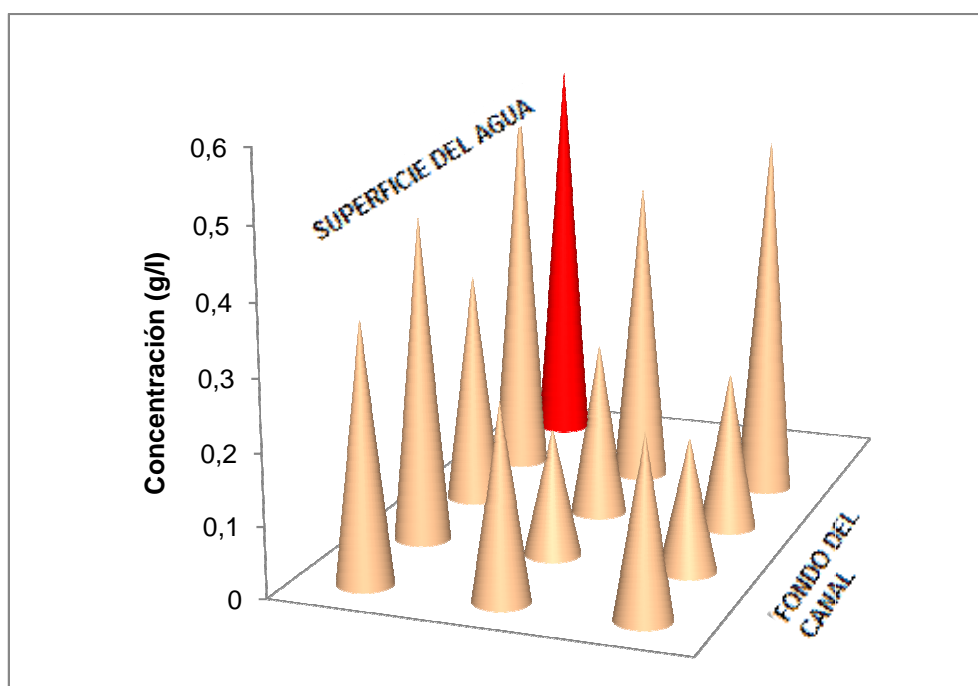
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.33 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA



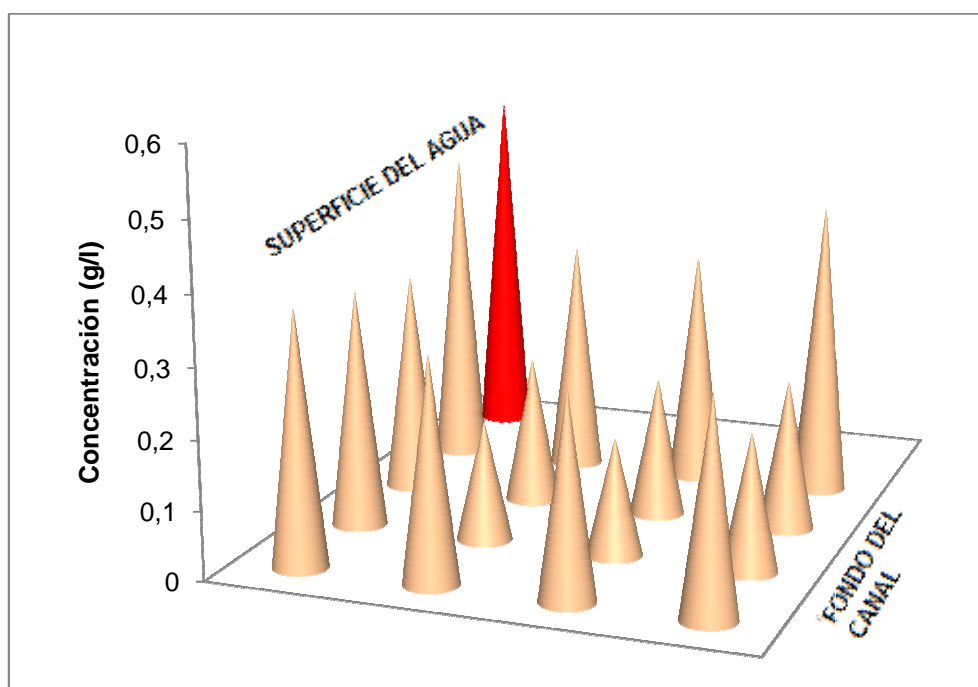
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.34 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_2 = 30,17$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA



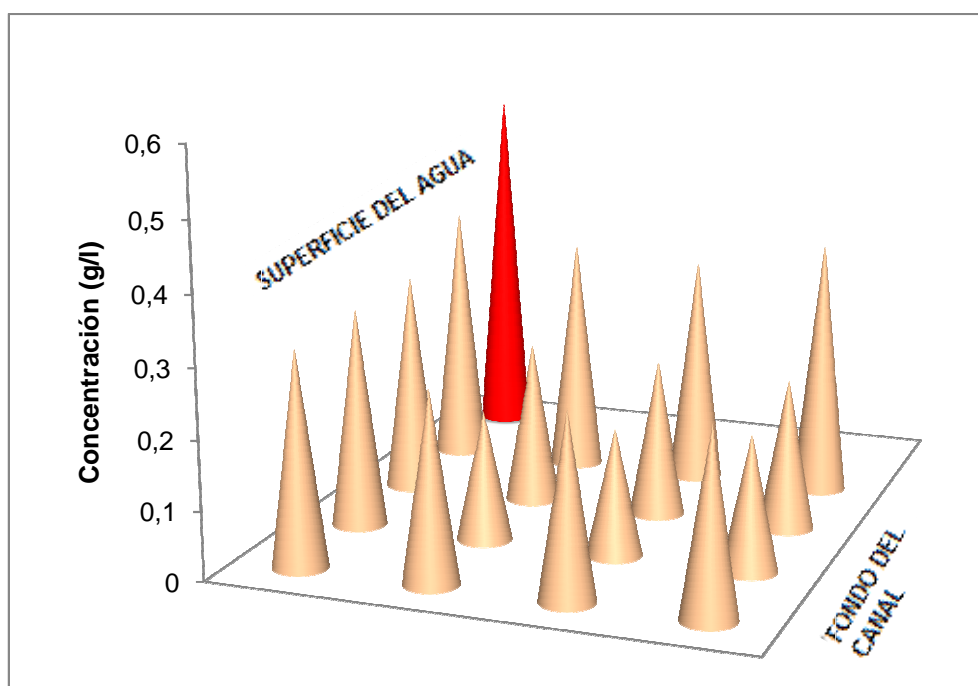
FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.35 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN A FONDO HACIA ARRIBA



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

GRÁFICO 3.36 CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO PARA EL $Q_3 = 46,09$ l/s Y EL PUNTO DE MUESTREO 2. PUNTO DE INYECCIÓN B FONDO HACIA ARRIBA



FUENTE Y ELABORACIÓN: María Belén Aldás

De la observación de los gráficos anteriores, se puede notar que la distribución es mejor comparada con la determinada en el punto de muestreo 1, esto gracias al cambio de sección que sufre el flujo hasta llegar al final del aforador.

Sin embargo, las distribuciones observadas no son ideales, puesto que son claras las diferencias entre las concentraciones en cada punto, aunque no se observa una marcada concentración del trazador solo en el fondo del canal, como en los otros casos.

Además, para el caudal máximo, las concentraciones son menores a la media esperada, esto puede suceder debido a que las mayores concentraciones pueden encontrarse en la superficie del flujo, donde no existían mangueras de monitoreo, por las razones ya explicadas.

3.9 RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA

Si la mezcla del cloruro de sodio con toda la masa de agua se hubiese llevado a cabo de manera ideal, esto es, de forma total, los valores de las concentraciones registradas deberían ser similares entre sí y cercanos al valor de la concentración media calculada mediante balance de masa para cada prueba.

De forma general, puede notarse que, para el punto de muestreo 1, cuando la inyección de la solución de cloruro de sodio se realiza sobre la superficie del agua, los mayores valores de concentración se encuentran en la

parte superior de la sección transversal del flujo, mientras que cuando la inyección se hace en el fondo del canal, en contracorriente o hacia arriba, los mayores valores de concentración se encuentran en la parte inferior de la sección transversal. Para el punto de muestreo 2, se observa que la distribución del trazador mejora, aunque la mezcla no es ideal, no se aprecian marcadamente zonas de mayor concentración del mismo.

A pesar de que para los caudales medio y máximo los gradientes hidráulicos son adecuados, es decir, mayores a 1000 s^{-1} , no se observa una buena mezcla en las pruebas realizadas con estos caudales.

Con respecto a los tiempos de retención, para los tres caudales, los mismos se encuentran dentro de los tiempos recomendados puesto que son menores a un segundo, pese a este hecho, las concentraciones en cada punto difieren, es decir, el agua atraviesa en un tiempo bastante corto por el aforador, pero sin que toda la masa logre estar en contacto con el cloruro de sodio.

Las pérdidas de carga son relativamente pequeñas, lo cual indica que para lograr una buena mezcla es posible que se requieran pérdidas mayores, y por tanto estructuras de mayor tamaño.

Durante la realización de las pruebas, se observó que la superficie del líquido adquirió una forma ligeramente cóncava, lo que explica, en parte, la existencia de concentraciones mayores de trazador en las zonas cercanas al fondo y a las paredes. Esto puede deberse a que la velocidad del flujo cerca a las paredes es menor debido a las fuerzas de fricción que se genera, y además,

debido a que el flujo se ve alterado por la presencia de las mallas y las mangueras, el agua tiende a estancarse en dichas zonas.

De los resultados obtenidos al realizar los ensayos de mezcla rápida, se puede afirmar que los valores de las concentraciones difieren de manera importante entre sí y con la concentración media, y se observa claramente que ciertas zonas de la sección transversal reciben elevada cantidad de cloruro de sodio, mientras que otras reciben poca o ninguna.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La posición de inyección del trazador en el fondo del canal y en contracorriente presenta mejores resultados de distribución que las otras posiciones, aunque no son suficientes para lograr una mezcla óptima.
- El caudal de trabajo con el que se logra mejores resultados es el más alto, 46,09 l/s, cuando la inyección se hace en el fondo en contracorriente y en la garganta del aforador.
- De los tres caudales de trabajo, la velocidad del agua correspondiente al caudal máximo es la que más se aproxima a la recomendada de 2 m/s.
- Los tiempos de retención del agua obtenidos en todos los ensayos son menores a un segundo.

- Las pérdidas de carga registradas son relativamente pequeñas y requieren de un desnivel también pequeño, lo que representa una ventaja en el uso de este aforador.
- Los gradientes de velocidad que se obtuvieron son adecuados para los caudales medio y máximo, que son mayores a 1000 s^{-1} , el gradiente correspondiente al menor caudal, de $421,18 \text{ s}^{-1}$ es demasiado bajo.
- Los números de Froude registrados en las diferentes zonas del aforador Parshall, evidencian el cambio de régimen subcrítico a supercrítico.
- A pesar de que varios de los valores de los parámetros hidráulicos se aproximan a los recomendados en bibliografía para lograr la mezcla rápida, no se obtiene mezcla ideal para ninguno de los tres caudales.
- El aforador Parshall no es un dispositivo que pueda utilizarse como mezclador rápido de forma eficiente, puesto que las concentraciones registradas en los dos puntos de muestreo difieren de forma importante de la concentración esperada.

4.2 RECOMENDACIONES

- No se recomienda utilizar el aforador Parshall como mezclador rápido, puesto que el consumo de coagulantes puede resultar excesivo.
- Se recomienda realizar ensayos utilizando otras unidades como mezcladores rápidos, como reactores tubulares u otras estructuras hidráulicas que produzcan la mezcla adecuada.
- Se recomienda realizar ensayos de mezcla rápida variando la velocidad de inyección de la solución de trazador y variando el método de inyección del mismo, así como los dispositivos de inyección.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, (2002), Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de Suministros de Agua Comunitaria, Madrid, Mc Graw Hill.
2. ANDÍA, Yolanda, (2000), Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación, SEDAPAL, Lima.
http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
3. ARBOLEDA, Jorge, (1973), Teoría y Práctica de la Purificación del Agua.
4. AZEVEDO, José, (2002), Manual de Hidráulica, octava edición, Brasil, Editora Edgard Blücker Ltda.
5. AZEVEDO, José, et al, (1977), Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água, Volumen 2, segunda edición, São Paulo, CETESB.
6. BLAS, Luis, (1963), Agenda del Químico, Tercera Edición, Madrid, Aguilar S. A. de Ediciones.

7. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE, (1981), Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Serie Técnica 13, Lima.
8. CHOW, Ven Te, (1982), Open Chanel Hydraulics, México, Editorial Diana.
9. DEGRÉMONT, (1979), Manual Técnico del Agua, cuarta edición, Madrid, Gráficas Grijelmo, S. A.
10. DE VARGAS, Lidia, (2004), Floculación, CEPIS, Lima.
11. GARZÓN, Oscar y ROSAS, Wilkinson, (2003), Evaluación de la planta de Potabilización de agua del Municipio de Villamaná. Aquamaná ESP, Manizales.
12. GILES, Randal, (1994), Mecánica de los Fluidos e Hidráulica, tercera edición, Madrid, Editorial McGraw Hill.
13. MENÉNDEZ, Ciro, (2007), Apuntes de clase Hidráulica Básica.
14. MOTT, Robert, (1996), Mecánica de Fluidos Aplicada, México, Editorial Prentice Hall.
15. PAES, Francilio, (1979), Teoria e Técnicas de Tratamento de Água, São Paulo, CETESB.

16. PEDROZA, Edmundo, (2001), Serie Autodidáctica de Medición, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
17. ROMO, Luis, (1981), Coloideofísica. Coloideoquímica. Fenómenos de superficie, Editorial Universitaria.
18. SILVA, Milton, (2007) Apuntes de clase Operaciones unitarias I.
19. SOTELO, Gilberto, (1997), Hidráulica General, Volumen 1, México, Editorial Limusa.
20. TORRES, C., VÁSQUEZ, E., (2010), Análisis de medidores de Caudal para flujo subcrítico en Sistemas de alcantarillado, EPN.
21. ZETA-METER, INC, Potencial Z: un curso completo en 5 minutos.
<http://www.melvynbecerra.cl/images/13.pdf>

ANEXOS

ANEXO No. 1

CURVA DE DESCARGA DEL AFORADOR PARSHALL

Tabla A.1 Calado y caudal obtenido experimentalmente en el aforador Parshall, con el monitor de flujo Greyline OCF 4.0

h (cm)	h (m)	Q (l/s)
7,773	0,078	3,393
11,145	0,111	5,924
14,871	0,149	9,257
17,874	0,179	12,302
20,880	0,209	15,645
23,567	0,236	18,867
25,940	0,259	21,888
28,072	0,281	24,728
29,885	0,299	27,245
31,923	0,319	30,172
33,845	0,338	33,025
36,787	0,368	37,575
39,463	0,395	41,893

Fuente: TORRES, C., VÁSQUEZ, E., 2010

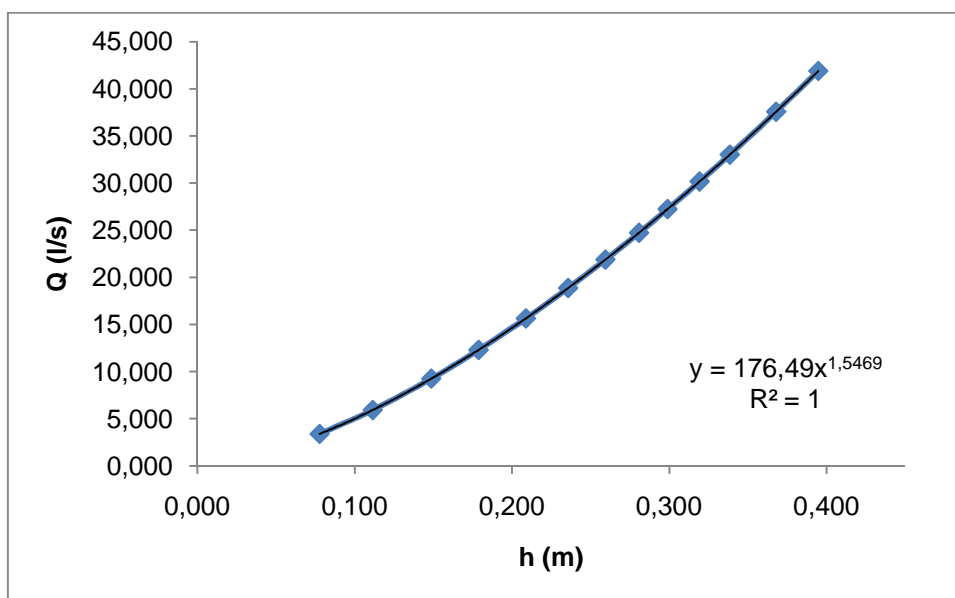


Gráfico A.1 Curva de descarga del aforador Parshall

Elaborado por: Ma. Belén Aldás

ANEXO No. 2

ALTURAS DEL LÍQUIDO EN EL AFORADOR PARSHALL

Tabla A.2 Calados del líquido en el aforador Parshall

Q₁= 20,67 l/s					
h₁ (m)	h₂ (m)	h₃ (m)	h₄ (m)	h₅ (m)	h₆ (m)
0,250	0,210	0,190	0,175	0,065	0,055
h_{1'} (m)	h_{2'} (m)	h_{3'} (m)	h_{4'} (m)	h_{5'} (m)	h_{6'} (m)
0,210	0,250	0,305	0,345	0,415	0,430
Q₂= 30,17 l/s					
h₁ (m)	h₂ (m)	h₃ (m)	h₄ (m)	h₅ (m)	h₆ (m)
0,319	0,275	0,250	0,235	0,080	0,065
h_{1'} (m)	h_{2'} (m)	h_{3'} (m)	h_{4'} (m)	h_{5'} (m)	h_{6'} (m)
0,141	0,185	0,245	0,285	0,400	0,420
Q₃= 46,09 l/s					
h₁ (m)	h₂ (m)	h₃ (m)	h₄ (m)	h₅ (m)	h₆ (m)
0,425	0,375	0,355	0,335	0,130	0,085
h_{1'} (m)	h_{2'} (m)	h_{3'} (m)	h_{4'} (m)	h_{5'} (m)	h_{6'} (m)
0,035	0,080	0,135	0,165	0,355	0,400

Elaborado por: Ma. Belén Aldás

ANEXO No. 3**CURVA DE CALIBRACIÓN CONCENTRACIÓN vs.
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PARA LAS SOLUCIONES
DE CLORURO DE SODIO**

Tabla A.3 Datos de conductividad y concentración de las soluciones de cloruro de sodio

Conductividad (μS)	Concentración (g/l)
369	0
2950	1
3120	2
5720	5
10510	10
18320	20
23800	30
35700	50
58400	100
86400	200

Elaborado por: Ma. Belén Aldás

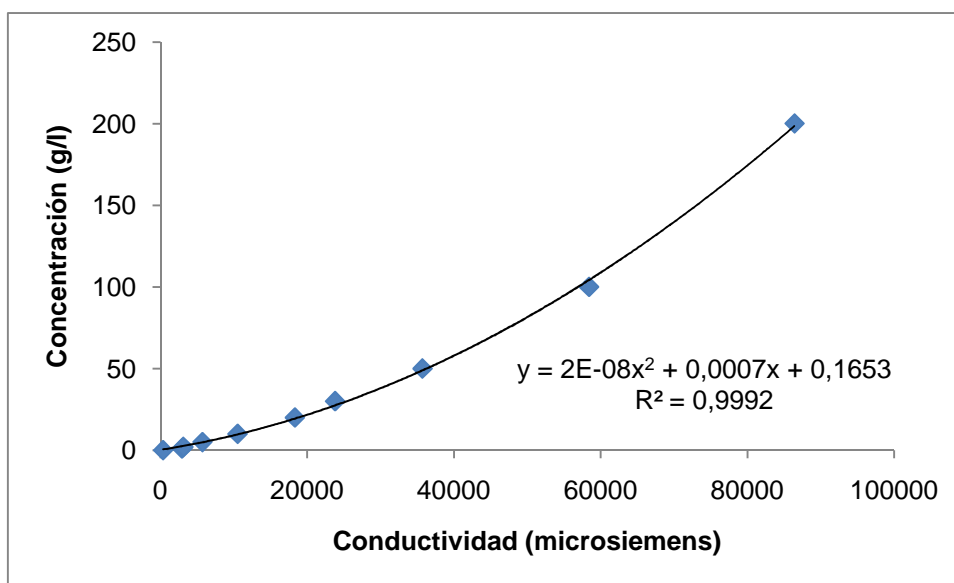


Gráfico A.2 Curva de calibración Concentración vs. Conductividad

Elaborado por: Ma. Belén Aldás

ANEXO No.4
DIMENSIONES DEL AFORADOR PARSHALL

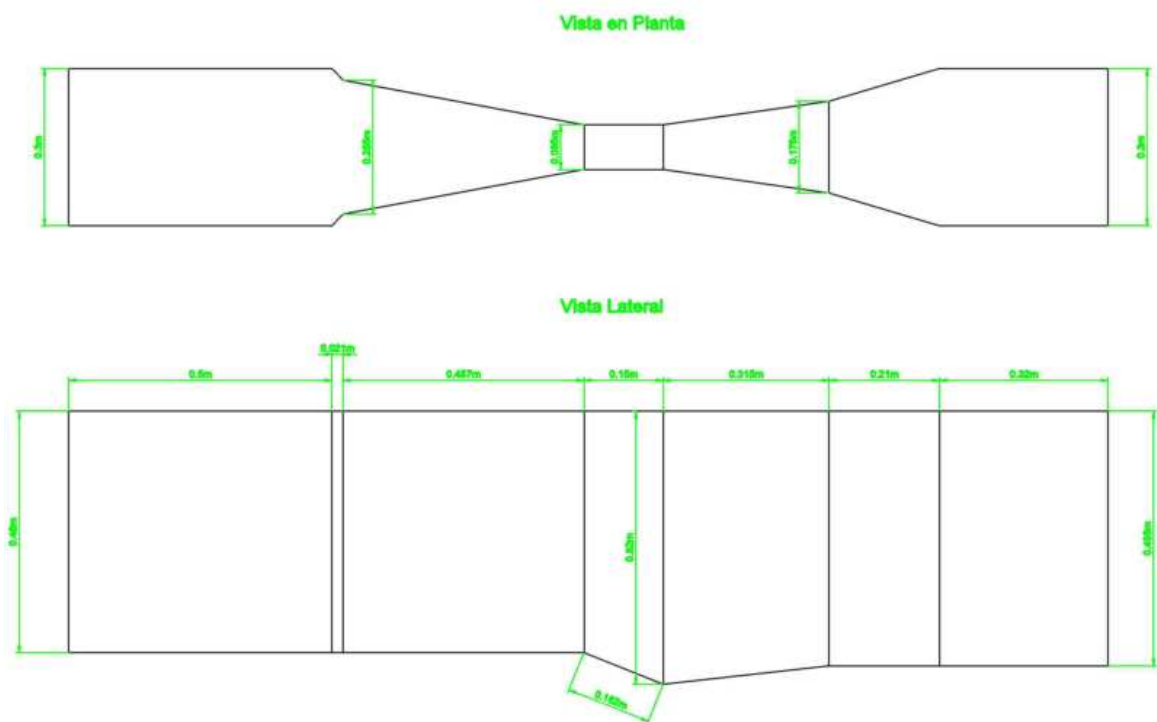


Figura A.1 Vista en Planta y Lateral del Aforador Parshall

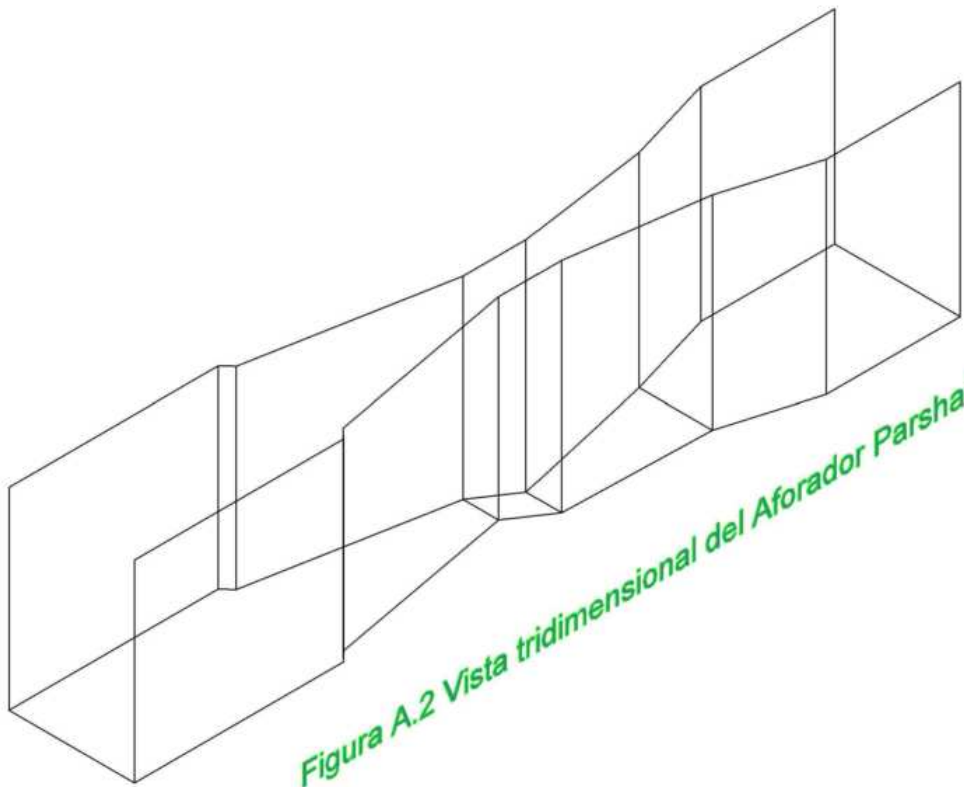


Figura A.2 Vista tridimensional del Aforador Parshall

ANEXO No. 5

**DATOS EXPERIMENTALES DE CONDUCTIVIDAD DE
LAS MUESTRAS DE LOS ENSAYOS DE MEZCLA RÁPIDA**

Tabla A.4 Datos experimentales de conductividad eléctrica

PRUEBA 1					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección A sobre el flujo					
Conductividad inicial = 250 microsiemens					
Concentración inicial = 0,342 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	241	251	249	251	1
2	250	249	250	250	0
3	249	250	250	250	0
4	250	250	249	250	0
5	482	432	595	503	253
6	351	258	266	292	42
7	275	246	242	254	4
8	250	249	250	250	0
9	819	944	980	914	664
10	531	514	513	519	269
11	416	385	266	356	106
12	254	307	281	281	31
PRUEBA 2					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección A en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 255 microsiemens					
Concentración inicial = 0,345 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1455	1142	1700	1432	1177
2	1363	896	1650	1303	1048
3	1306	1465	1332	1368	1113
4	1524	1910	1120	1518	1263
5	1256	982	1360	1199	944
6	407	404	429	413	158
7	573	778	345	565	310
8	1434	1500	798	1244	989
9	1676	1140	1550	1455	1200
10	297	288	293	293	38
11	352	432	264	349	94
12	1308	1125	823	1085	830
PRUEBA 3					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección A en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 265 microsiemens					
Concentración inicial = 0,352 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	484	937	1907	1109	844
2	627	872	1632	1044	779
3	1322	1322	1710	1451	1186

4	1360	1640	1580	1527	1262
5	556	776	1200	844	579
6	442	336	450	409	144
7	1016	805	420	747	482
8	1460	1560	1400	1473	1208
9	484	855	1116	818	553
10	287	277	280	281	16
11	512	644	276	477	212
12	1860	1890	1750	1833	1568

PRUEBA 4

Q = 20,67 l/s

Punto inyección B sobre el flujo

Conductividad inicial = 270 microsiemens

Concentración inicial = 0,356 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	266	267	365	299	29
2	267	266	290	274	4
3	270	267	272	270	0
4	269	270	270	270	0
5	267	267	368	301	31
6	270	269	270	270	0
7	270	270	269	270	0
8	270	269	270	270	0
9	297	636	972	635	365
10	295	318	451	355	85
11	465	307	284	352	82
12	355	356	360	357	87

PRUEBA 5

Q = 20,67 l/s

Punto inyección B en el fondo contracorriente

Conductividad inicial = 287 microsiemens

Concentración inicial = 0,368 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	891	798	739	809	522
2	799	806	770	792	505
3	1229	1315	1400	1315	1028
4	1919	1931	1700	1850	1563
5	884	971	787	881	594
6	488	555	569	537	250
7	1030	841	923	931	644
8	1851	1788	1668	1769	1482
9	601	721	629	650	363
10	316	317	329	321	34
11	799	360	399	519	232
12	1463	1302	952	1239	952

PRUEBA 6

Q = 20,67 l/s

Punto inyección B en el fondo arriba

Conductividad inicial = 288 microsiemens

Concentración inicial = 0,369 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1073	568	683	775	487
2	1414	591	545	850	562
3	1237	1157	891	1095	807
4	1821	1630	1650	1700	1412
5	1236	950	942	1043	755
6	360	319	296	325	37
7	345	515	520	460	172
8	1390	1650	1560	1533	1245
9	1722	1027	1373	1374	1086
10	333	300	328	320	32
11	291	332	363	329	41
12	1380	1730	1550	1553	1265
PRUEBA 7					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección A sobre el flujo					
Conductividad inicial = 285 microsiemens					
Concentración inicial = 0,366 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	297	315	276	315	30
2	288	282	285	285	0
3	284	285	285	285	0
4	285	284	285	285	0
5	317	281	281	293	8
6	320	281	279	293	8
7	287	284	286	286	1
8	284	285	285	285	0
9	328	304	295	309	24
10	319	283	290	297	12
11	285	284	285	285	0
12	284	285	278	285	0
13	1871	1783	1262	1639	1354
14	416	402	423	414	129
15	324	296	301	307	22
16	419	398	595	471	186
PRUEBA 8					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección A en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 291 microsiemens					
Concentración inicial = 0,371 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	932	743	689	743	452
2	554	512	478	515	224
3	672	761	688	707	416
4	980	1733	1333	1349	1058
5	1165	950	872	996	705
6	320	318	324	321	30

7	474	494	512	493	202
8	865	1416	1342	1208	917
9	752	1112	1061	975	684
10	318	314	311	314	23
11	572	424	438	478	187
12	889	1236	1340	1155	864
13	314	328	343	328	37
14	328	299	303	310	19
15	919	488	447	618	327
16	927	1016	1193	1045	754

PRUEBA 9

Q = 30,17 l/s

Punto inyección A en el fondo arriba

Conductividad inicial = 303 microsiemens

Concentración inicial = 0,379 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1055	1178	1031	1088	785
2	614	685	650	650	347
3	1013	1092	1143	1083	780
4	1593	1631	1762	1662	1359
5	1027	1173	1044	1081	778
6	321	335	381	346	43
7	352	428	431	404	101
8	1305	1245	1255	1268	965
9	1469	1333	1310	1371	1068
10	363	330	331	341	38
11	348	424	373	382	79
12	1006	1095	1012	1038	735
13	434	428	404	422	119
14	368	303	304	325	22
15	430	380	381	397	94
16	828	563	583	658	355

PRUEBA 10

Q = 30,17 l/s

Punto inyección B sobre el flujo

Conductividad inicial = 302 microsiemens

Concentración inicial = 0,379 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	319	324	292	324	22
2	302	301	302	302	0
3	296	301	302	302	0
4	302	302	302	302	0
5	302	302	301	302	0
6	293	293	326	304	2
7	301	302	302	302	0
8	302	301	302	302	0
9	301	298	342	314	12
10	301	297	311	303	1
11	302	302	301	302	0

12	301	302	303	302	0
13	1503	1582	1386	1490	1188
14	337	367	372	359	57
15	304	309	303	305	3
16	439	390	535	455	153
PRUEBA 11					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección B en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 308 microsiemens					
Concentración inicial = 0,383 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1071	817	803	817	509
2	689	576	578	614	306
3	810	591	732	711	403
4	1359	1140	1586	1362	1054
5	1256	1078	1110	1148	840
6	402	378	417	399	91
7	599	711	701	670	362
8	1373	1390	1710	1491	1183
9	845	518	702	688	380
10	326	324	338	329	21
11	433	638	516	529	221
12	1126	1694	1630	1483	1175
13	377	340	338	352	44
14	307	308	308	308	0
15	363	419	357	380	72
16	592	928	621	714	406
PRUEBA 12					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección B en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 314 microsiemens					
Concentración inicial = 0,387 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1377	1312	1469	1312	998
2	812	836	970	873	559
3	969	1053	1321	1114	800
4	1513	1622	1741	1625	1311
5	1578	1553	1475	1535	1221
6	356	346	351	351	37
7	490	432	432	451	137
8	1311	1304	1241	1285	971
9	1171	1573	1583	1442	1128
10	326	321	333	327	13
11	401	343	320	355	41
12	1081	1036	865	994	680
13	345	427	477	416	102
14	312	311	312	312	-2
15	344	362	320	342	28
16	630	542	446	539	225

PRUEBA 13					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección A sobre el flujo					
Conductividad inicial = 320 microsiemens					
Concentración inicial = 0,391 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	328	328	309	322	2
2	320	320	320	320	0
3	320	319	320	320	0
4	321	319	320	320	0
5	320	320	320	320	0
6	318	321	322	320	0
7	320	320	320	320	0
8	321	319	320	320	0
9	315	354	320	330	10
10	321	318	322	320	0
11	320	320	320	320	0
12	319	320	320	320	0
13	712	871	628	737	417
14	363	321	325	336	16
15	321	319	320	320	0
16	320	320	320	320	0
17	1348	1141	920	1136	816
18	370	343	341	351	31
19	314	360	324	333	13
20	690	923	887	833	513
21	1590	1927	1896	1804	1484
22	900	697	891	829	509
23	338	370	387	365	45
24	1925	1821	1350	1699	1379
PRUEBA 14					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección A en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 320 microsiemens					
Concentración inicial = 0,391 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1046	1060	1187	986	666
2	751	654	852	769	449
3	800	746	903	930	610
4	1270	1186	1243	1238	918
5	1224	1178	1258	939	619
6	406	433	414	452	132
7	495	534	517	725	405
8	1129	1110	1145	1027	707
9	778	684	842	603	283
10	348	372	346	400	80
11	472	512	480	641	321
12	1014	1016	940	784	464
13	336	335	322	330	10

14	325	332	320	365	45
15	492	487	439	580	260
16	912	991	762	743	423
17	328	326	326	326	6
18	323	322	325	344	24
19	422	468	386	448	128
20	503	578	453	467	147
21	321	322	319	320	0
22	318	318	318	328	8
23	353	368	347	347	27
24	320	320	319	320	0

PRUEBA 15

Q = 41,89 l/s

Punto inyección A en el fondo arriba

Conductividad inicial = 322 microsiemens

Concentración inicial = 0,393 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1380	1210	1225	1272	950
2	899	837	741	826	504
3	983	930	956	956	634
4	1436	1412	1551	1466	1144
5	1530	1437	1420	1462	1140
6	398	358	375	377	55
7	474	433	419	442	120
8	1133	1144	1190	1156	834
9	1097	1151	1246	1165	843
10	348	355	348	350	28
11	410	399	405	405	83
12	987	1061	1079	1042	720
13	336	338	345	340	18
14	328	331	332	330	8
15	487	448	442	459	137
16	636	767	787	730	408
17	326	327	332	328	6
18	320	321	325	322	0
19	347	350	352	350	28
20	321	324	327	324	2
21	322	321	322	322	0
22	322	322	322	322	0
23	322	321	323	322	0
24	322	321	322	322	0

PRUEBA 16

Q = 41,89 l/s

Punto inyección B sobre el flujo

Conductividad inicial = 320 microsiemens

Concentración inicial = 0,391 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	330	331	311	324	4
2	320	320	321	320	0

3	320	320	321	320	0
4	320	320	321	320	0
5	320	320	321	320	0
6	321	320	319	320	0
7	322	320	318	320	0
8	320	320	320	320	0
9	322	320	318	320	0
10	321	320	319	320	0
11	320	321	320	320	0
12	322	320	318	320	0
13	359	478	458	432	112
14	321	320	319	320	0
15	322	320	318	320	0
16	321	320	319	320	0
17	623	835	793	750	430
18	319	324	388	344	24
19	316	321	323	320	0
20	502	474	572	516	196
21	1580	1809	1770	1720	1400
22	493	624	721	613	293
23	319	330	383	344	24
24	1490	1590	1710	1597	1277

PRUEBA 17

Q = 41,89 l/s

Punto inyección B en el fondo contracorriente

Conductividad inicial = 322 microsiemens

Concentración inicial = 0,393 g/l

No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1077	1211	1128	3416	3094
2	790	868	841	2499	2177
3	895	924	823	2642	2320
4	1145	1272	1183	3600	3278
5	1197	1318	1201	3716	3394
6	481	495	449	1425	1103
7	638	592	564	1794	1472
8	1184	1171	1153	3508	3186
9	696	710	671	2077	1755
10	353	342	363	1058	736
11	455	469	485	1409	1087
12	1021	1061	1135	3217	2895
13	355	351	347	1053	731
14	321	322	322	965	643
15	350	368	394	1112	790
16	679	782	931	2392	2070
17	324	326	330	980	658
18	318	322	321	961	639
19	332	333	343	1008	686
20	377	433	513	1323	1001
21	319	325	323	967	645
22	317	320	320	957	635

23	318	325	326	969	647
24	316	327	324	967	645
PRUEBA 18					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección B en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 325 microsiemens					
Concentración inicial = 0,395 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	1339	1465	1561	1455	1130
2	904	991	1104	1000	675
3	934	998	1104	1012	687
4	876	964	1048	963	638
5	1597	1760	1805	1721	1396
6	409	452	524	462	137
7	600	631	570	600	275
8	820	838	1112	923	598
9	1300	1399	1444	1381	1056
10	336	355	347	346	21
11	446	400	392	413	88
12	660	612	646	639	314
13	385	365	416	389	64
14	326	323	325	325	0
15	396	336	331	354	29
16	362	332	331	342	17
17	324	325	325	325	0
18	325	325	324	325	0
19	324	325	325	325	0
20	325	325	325	325	0
21	324	325	325	325	0
22	325	325	325	325	0
23	324	325	326	325	0
24	325	325	325	325	0
PRUEBA 19					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección A sobre el flujo					
Conductividad inicial = 329 microsiemens					
Concentración inicial = 0,398 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	978	878	1104	987	658
2	409	384	407	400	71
3	344	377	356	359	30
4	392	420	433	415	86
5	1370	1188	1376	1311	982
6	818	815	634	756	427
7	657	602	625	628	299
8	642	638	649	643	314
9	1122	931	1330	1128	799
10	1135	940	1123	1066	737
11	567	578	604	583	254

12	470	530	505	502	173
PRUEBA 20					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección A en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 332 microsiemens					
Concentración inicial = 0,4 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	538	624	886	683	351
2	511	526	671	569	237
3	856	721	849	809	477
4	1039	1480	1270	1263	931
5	587	621	718	642	310
6	430	408	516	451	119
7	697	731	690	706	374
8	775	1505	984	1088	756
9	720	722	780	741	409
10	865	863	891	873	541
11	749	749	764	754	422
12	849	1568	1342	1253	921
PRUEBA 21					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección A en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 334 microsiemens					
Concentración inicial = 0,401 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	718	427	674	606	272
2	828	459	807	698	364
3	1066	823	1091	993	659
4	1026	1684	1291	1334	1000
5	712	462	661	612	278
6	516	375	441	444	110
7	539	708	581	609	275
8	736	1323	963	1007	673
9	985	490	791	755	421
10	893	905	878	892	558
11	976	946	865	929	595
12	1162	1873	1503	1513	1179
PRUEBA 22					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección B sobre el flujo					
Conductividad inicial = 338 microsiemens					
Concentración inicial = 0,404 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	534	577	901	671	333
2	379	415	388	394	56
3	384	368	384	379	41
4	432	420	409	420	82
5	839	1028	1741	1203	865

6	836	897	917	883	545
7	749	932	936	872	534
8	774	706	614	698	360
9	668	686	1201	852	514
10	650	625	714	663	325
11	617	596	620	611	273
12	576	451	492	506	168
PRUEBA 23					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección B en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 338 microsiemens					
Concentración inicial = 0,404 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	993	1122	702	939	601
2	572	583	460	538	200
3	612	627	634	624	286
4	763	746	1130	880	542
5	971	1024	781	925	587
6	604	536	458	533	195
7	506	561	633	567	229
8	626	661	671	653	315
9	1028	1150	965	1048	710
10	973	988	997	986	648
11	857	877	901	878	540
12	829	830	890	850	512
PRUEBA 24					
Q = 20,67 l/s					
Punto inyección B en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 340 microsiemens					
Concentración inicial = 0,406 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	634	1038	1036	903	563
2	458	642	626	575	235
3	687	632	721	680	340
4	1026	710	900	879	539
5	779	1070	1109	986	646
6	391	413	424	409	69
7	503	373	397	424	84
8	837	721	795	784	444
9	905	1319	1301	1175	835
10	896	885	888	890	550
11	910	948	934	931	591
12	1148	989	1166	1101	761
PRUEBA 25					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección A sobre el flujo					
Conductividad inicial = 340 microsiemens					
Concentración inicial = 0,406 g/l					
No. Muestra	Ensayo	Ensayo	Ensayo	PROMEDIO	Promedio menos

	1	2	3		inicial
1	900	893	1057	950	610
2	448	537	448	478	138
3	415	375	361	384	44
4	363	348	366	359	19
5	1095	1045	1418	1186	846
6	547	555	523	542	202
7	500	473	457	477	137
8	453	452	596	500	160
9	1081	1095	1392	1189	849
10	618	648	679	648	308
11	745	732	742	740	400
12	562	475	586	541	201
PRUEBA 26					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección A en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 343 microsiemens					
Concentración inicial = 0,408 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	432	530	500	530	187
2	384	410	436	410	67
3	463	472	555	497	154
4	924	991	1023	979	636
5	434	490	483	469	126
6	391	357	385	378	35
7	490	484	516	497	154
8	789	866	789	815	472
9	531	585	616	577	234
10	567	578	577	574	231
11	654	656	598	636	293
12	791	899	840	843	500
PRUEBA 27					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección A en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 346 microsiemens					
Concentración inicial = 0,41 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	426	377	479	427	81
2	404	374	393	390	44
3	473	467	482	474	128
4	1035	1042	1260	1112	766
5	466	411	521	466	120
6	398	395	371	388	42
7	443	546	386	458	112
8	771	893	907	857	511
9	590	475	681	582	236
10	755	743	768	755	409
11	786	775	732	764	418
12	866	1064	948	959	613

PRUEBA 28					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección B sobre el flujo					
Conductividad inicial = 348 microsiemens					
Concentración inicial = 0,411 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	664	621	658	621	273
2	371	361	384	372	24
3	350	356	354	353	5
4	348	350	349	349	1
5	1018	989	797	935	587
6	478	483	522	494	146
7	419	539	461	473	125
8	377	441	394	404	56
9	878	983	689	850	502
10	743	742	741	742	394
11	597	614	623	611	263
12	391	622	409	474	126
PRUEBA 29					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección B en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 349 microsiemens					
Concentración inicial = 0,412 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	501	509	533	509	160
2	387	393	383	388	39
3	432	431	450	438	89
4	842	763	973	859	510
5	472	483	515	490	141
6	378	410	398	395	46
7	467	509	527	501	152
8	735	702	851	763	414
9	578	628	658	621	272
10	629	635	655	640	291
11	678	699	687	688	339
12	765	805	954	841	492
PRUEBA 30					
Q = 30,17 l/s					
Punto inyección B en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 350 microsiemens					
Concentración inicial = 0,413 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	473	473	543	496	146
2	376	372	390	379	39
3	417	432	450	433	93
4	774	859	925	853	513
5	464	472	577	504	164

6	355	358	394	369	29
7	451	472	478	467	127
8	719	735	759	738	398
9	554	585	727	622	282
10	765	764	752	760	420
11	543	576	623	581	241
12	827	900	945	891	551
PRUEBA 31					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección A sobre el flujo					
Conductividad inicial = 349 microsiemens					
Concentración inicial = 0,412 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	614	473	579	555	206
2	369	363	390	374	25
3	368	361	369	366	17
4	349	348	349	349	0
5	678	585	657	640	291
6	381	384	384	383	34
7	411	392	396	400	51
8	365	353	351	356	7
9	709	650	702	687	338
10	490	507	480	492	143
11	478	489	480	482	133
12	399	377	361	379	30
13	737	683	782	734	385
14	655	667	654	659	310
15	558	568	593	573	224
16	493	462	401	452	103
PRUEBA 32					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección A en el fondo contracorriente					
Conductividad inicial = 352 microsiemens					
Concentración inicial = 0,414 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	499	543	534	477	125
2	389	405	388	410	58
3	474	459	436	537	185
4	822	784	678	702	350
5	476	516	499	457	105
6	378	358	378	390	38
7	410	431	435	474	122
8	698	664	582	636	284
9	497	546	545	491	139
10	385	364	431	401	49
11	396	432	453	482	130
12	725	671	617	658	306
13	570	592	578	556	204
14	498	489	505	512	160

15	547	539	550	566	214
16	736	686	612	474	122
PRUEBA 33					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección A en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 354 microsiemens					
Concentración inicial = 0,416 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	554	565	555	558	204
2	396	400	403	400	46
3	436	456	395	429	75
4	712	736	737	728	374
5	520	550	547	539	185
6	364	351	364	360	6
7	409	410	397	405	51
8	580	605	626	604	250
9	558	588	576	574	220
10	367	358	378	368	14
11	418	410	443	424	70
12	588	601	620	603	249
13	621	652	645	639	285
14	600	611	617	609	255
15	556	560	613	576	222
16	764	797	760	774	420
PRUEBA 34					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección B sobre el flujo					
Conductividad inicial = 357 microsiemens					
Concentración inicial = 0,418 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	470	460	438	456	99
2	367	358	354	360	3
3	357	353	361	357	0
4	357	357	358	357	0
5	528	515	522	522	165
6	380	370	377	376	19
7	364	388	380	377	20
8	372	351	392	372	15
9	572	564	600	579	222
10	484	519	489	497	140
11	420	481	439	447	90
12	404	361	434	400	43
13	598	647	616	620	263
14	554	552	449	518	161
15	523	528	519	523	166
16	448	394	511	451	94
PRUEBA 35					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección B en el fondo contracorriente					

Conductividad inicial = 354 microsiemens					
Concentración inicial = 0,416 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	501	527	546	1574	1220
2	413	428	435	1276	922
3	437	464	449	1350	996
4	640	655	645	1940	1586
5	480	507	513	1500	1146
6	392	401	406	1199	845
7	436	420	452	1308	954
8	588	581	592	1761	1407
9	494	516	515	1525	1171
10	383	392	389	1164	810
11	426	405	436	1267	913
12	564	581	616	1761	1407
13	503	562	531	1596	1242
14	515	517	522	1554	1200
15	477	469	483	1429	1075
16	530	575	603	1708	1354
PRUEBA 36					
Q = 41,89 l/s					
Punto inyección B en el fondo arriba					
Conductividad inicial = 358 microsiemens					
Concentración inicial = 0,418 g/l					
No. Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	PROMEDIO	Promedio menos inicial
1	493	510	503	502	144
2	394	397	407	399	50
3	422	426	454	434	85
4	633	625	705	654	305
5	488	510	508	502	153
6	378	393	374	382	33
7	448	459	437	448	99
8	585	572	629	595	246
9	502	525	512	513	164
10	391	414	369	391	42
11	455	471	452	459	110
12	605	573	659	612	263
13	543	570	549	554	205
14	555	567	580	567	218
15	578	588	543	570	221
16	624	612	725	654	305

ANEXO No. 6
EJEMPLOS DE CÁLCULOS

A continuación se presentan los ejemplos de cálculos de los realizados en esta investigación para el primer caudal de trabajo (20,67 l/s o 0,02067 m³/s). Los resultados correspondientes a los otros dos caudales, se obtuvieron por idénticos procedimientos.

1) Cálculo de la velocidad del agua en la garganta

Para el cálculo de la velocidad del agua en la garganta, se han tomado los datos de los calados del agua de la Tabla 3.1 y el ancho de la garganta, que es de 0,085 m.

$$A = a \quad d \quad l \quad g \quad a \quad a \quad x \quad c$$

$$A = 0,19 \, m \times 0,085 \, m = 0,01615 \, m^2$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0,02067 \frac{m^3}{s}}{0,01615 \, m^2} = 1,28 \frac{m}{s}$$

2) Cálculo del tiempo de retención del agua en la garganta

Para el cálculo del tiempo de retención se han utilizado los datos de las velocidades calculadas y la longitud de la garganta que es de 15 cm.

$$v = \frac{l}{t}$$

$$t = \frac{l}{v} = \frac{0,15 \, m}{1,28 \frac{m}{s}} = 0,117 \, s^{-1}$$

3) Cálculo de la pérdida de carga

Para la pérdida de carga se han utilizado los datos de las alturas del agua medidas en el aforador Parshall que se encuentran en el Anexo A.2. Se toman las mediciones realizadas en el punto 1 y el punto 6 del aforador.

$$\begin{array}{l}
 P \\
 \text{é} \\
 \text{r} \\
 \text{r} \\
 \text{d} \\
 \text{d} \\
 \text{d} \\
 \text{d} \\
 \text{a}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 d \\
 e \\
 e \\
 c \\
 f \\
 g \\
 a \\
 g
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 a = \Delta h = h'_6 - h'_1 \\
 a = \Delta h = 0,43 \text{ m} - 0,21 \text{ m} = 0,22 \text{ m}
 \end{array}$$

4) Cálculo del gradiente hidráulico

Para el cálculo de los gradientes hidráulicos, se utilizan los datos de las velocidades, de las pérdidas de carga, de los tiempos de retención calculados y además se utilizan los siguientes datos:

Peso específico del agua: $\gamma = 1000 \text{ N/m}^3$

Viscosidad cinemática del agua a 18°C: $\mu = 0,0106 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta h}{\mu \cdot t}}$$

$$G = \sqrt{\frac{1000 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \times 0,22 \text{ m}}{0,0106 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \times 0,117 \text{ s}}} = 421,18 \text{ s}^{-1}$$

5) Cálculo del número de Froude

Para el cálculo del número de Froude se utilizan los datos de las velocidades calculadas y los calados de la Tabla 3.1, además se utiliza el siguiente dato:

Aceleración de la gravedad: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

$$F = \frac{1,28 \frac{m}{s}}{\sqrt{9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,22 m}} = 0,93$$

6) Cálculo de la concentración inicial de cloruro de sodio en el agua circulante y de la concentración en un punto luego de la inyección de la solución de cloruro de sodio

De la curva de calibración de la conductividad eléctrica vs. la concentración de cloruro de sodio representada en el Gráfico A.2, se obtiene la ecuación:

$$y = 2 \times 10^{-8} x^2 + 0,0007 x + 0,1653$$

Siendo y la concentración de cloruro de sodio y x la conductividad eléctrica.

Para cuando la conductividad es 251 μ S,

$$y = 2 \times 10^{-8} (251)^2 + 0,0007 (251) + 0,1653$$

$$y = 0,342$$

La concentración es de 0,342 g/l.

7) Cálculo de la concentración media esperada en el agua circulante luego de la inyección de la solución de cloruro de sodio

Para el cálculo de la concentración media que el agua en el canal debería tener luego de la inyección de la solución de cloruro de sodio, se realiza un balance de masa, de acuerdo al siguiente esquema de la Figura A.3.

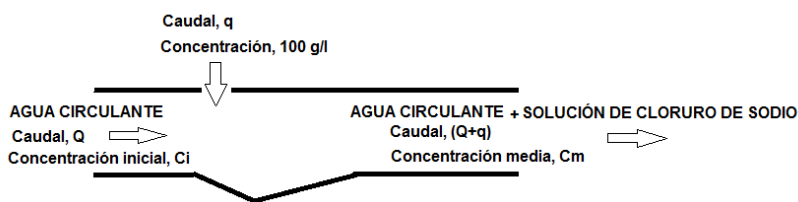


Figura A.3 Esquema para el balance de masa en el aforador Parshall

$$Q \times C_i + q \times 100 \frac{g}{l} = (Q + q) \times C_m$$

$$Q \times C_i + 0,05 \frac{l}{s} \times 100 \frac{g}{l} = (Q + 0,05 \frac{l}{s}) \times C_m$$

Para el primer caudal y para la primera prueba de mezcla rápida, $C_i = 0,342 \text{ g/l}$, entonces:

$$20,67 \frac{l}{s} \times 0,342 \frac{g}{l} + 0,05 \frac{l}{s} \times 100 \frac{g}{l} = (20,67 \frac{l}{s} + 0,05 \frac{l}{s}) \times C_m$$

$$C_m = 0,582 \frac{g}{l}$$

8) Cálculo de la diferencia entre las concentraciones medidas y la concentración media esperada

Para este cálculo se toma cada una de las concentraciones medidas y se resta de éstas las concentraciones medias para cada prueba.

$$D_i = C_i - C_m = 0,166 \frac{g}{l} - 0,582 \frac{g}{l} = -0,416 \frac{g}{l}$$

9) Cálculo del porcentaje de desviación de las concentraciones medidas y la concentración media esperada

Se toman los valores calculados anteriormente, y se aplica la fórmula:

$$\% \text{ de desviación} = \frac{\text{Diferencia entre la concentración medida y la concentración media esperada}}{\text{Concentración media esperada}} \times 100$$

$$= \frac{0,416 \text{ g/l}}{0,528 \text{ g/l}} \times 100 = 71,48$$

10) Cálculo del tiempo de retención del cloruro de sodio desde el punto de inyección hasta el punto de monitoreo

Para este cálculo, se utiliza el esquema de la Figura A.4 y los datos de la Tabla 3.1. Se calcula para cuando la inyección se hace en el punto B y el monitoreo en el punto 1.

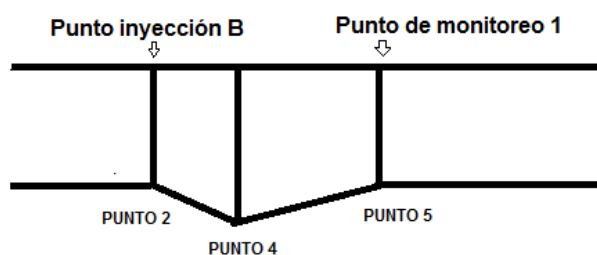


Figura A.4 Esquema para el cálculo del tiempo de retención del coagulante

Se calcula primero las velocidades en los puntos 2, 4 y 5. Con estos datos se calcula una velocidad promedio entre los puntos 2 y 4 y entre los puntos 4 y 5. Con las longitudes de

estos tramos, es decir de 2 a 4, 0,15 m y de 4 a 5 0,315 m, se calcula el tiempo en el que el agua atraviesa cada tramo. El tiempo de retención es la suma de estos tiempos.

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0,02067 \frac{m^3}{s}}{0,01785 m^2} = 1,16 \frac{m}{s}$$

$$v_4 = \frac{Q}{A_4} = \frac{0,02067 \frac{m^3}{s}}{0,014875 m^2} = 1,39 \frac{m}{s}$$

$$v_5 = \frac{Q}{A_5} = \frac{0,02067 \frac{m^3}{s}}{0,011375 m^2} = 1,82 \frac{m}{s}$$

$$v_{2-4} = \frac{1,16 \frac{m}{s} + 1,39 \frac{m}{s}}{2} = 1,275 \frac{m}{s}$$

11) Cálculo de la velocidad de inyección de la solución de trazador

Para este cálculo, se considera que el caudal total de inyección está dividido en 9 caudales que corresponden a las 9 perforaciones de las mangueras. Se calcula el área de cada perforación y se calcula la velocidad en las mismas.

$$\begin{aligned} \text{Área} &= \pi r^2 = \pi (1,5 \times 10^{-3} m)^2 = 7,07 \times 10^{-6} m^2 \\ \text{Caudal inyectado} &= \frac{C}{n} = \frac{0,05 \frac{l}{s}}{9} = 5,56 \times 10^{-3} \frac{l}{s} = 5,56 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \\ \text{Velocidad} &= \frac{C}{A} = \frac{5,56 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}}{7,07 \times 10^{-6} m^2} = 0,8 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

