



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**MÉTODOS DE AFORO PARA LA ESTIMACIÓN  
DE LA RECARGA DE ACUIFEROS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**JUAN ENRIQUE GALECIO VALDES**

**PROFESOR GUIA:  
CARLOS ALBERTO ESPINOZA CONTRERAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
YARKO IVÁN NIÑO CAMPOS  
MESENIA DEL CARMEN ATENAS VIVANCO**

**SANTIAGO DE CHILE  
JUNIO 2007**

## RESUMEN

Uno de los métodos para estimar la recarga de un acuífero se realiza por medio de aforos diferenciales. La validez de este procedimiento depende de la exactitud de las estimaciones de los caudales, ya que en muchos casos los errores producidos son comparables con las estimaciones de la recarga, lo que invalida los resultados. El objetivo más importante de este Trabajo de Título fue analizar distintos métodos de aforo, prestando especial atención al método de aforos químicos con trazadores, ya que tendría un nivel de exactitud adecuado. El trazador que se pretende evaluar es el Cloruro de Sodio, el cual presenta ventajas económicas, de manejo, almacenamiento, etc.

Existen distintos instrumentos que permiten medir el caudal pasante en un cauce, los cuales presentan distintos niveles de exactitud y condiciones de operación. Entre ellos encontramos sistemas convencionales, como: molinetes y tubos de Pitot, sistemas donde se interviene el cauce, como: vertederos y canaletas, sistemas modernos como los ADP y metodologías de aforo químico. Se hizo un análisis breve de cada uno de estos sistemas de medición, identificando los posibles factores de error.

En laboratorio se analizó el método de inyección instantánea de trazador, comparando este método con los caudales obtenidos a partir de una placa orificio conectada al canal. En estas experiencias se midió el caudal con diferentes condiciones de escurrimiento. Además se analizaron temas como mezcla a lo largo y ancho del cauce, influencia de compuertas y resaltos en la mezcla, efecto de inyectar el trazador en puntos con regímenes de escurrimiento distintos, entre otros. En los resultados se pudo ver que no se logra la mezcla completa en el canal, debido a que el largo de éste no es suficiente. Por otro lado se obtuvieron diferencias importantes en los valores de caudal con los dos métodos de medición, producidas posiblemente por un problema en el sistema de adquisición de datos.

En terreno se trabajó en un canal de bajo caudal y de dimensiones pequeñas, de forma de poder aplicar fácilmente distintos métodos de medición. Las experiencias realizadas fueron principalmente aforos químicos con inyección instantánea y se compararon los resultados con mediciones hechas con un molinete. Se pudo apreciar una diferencia entre estos caudales, producidas por un problema en la estimación de la velocidad media del flujo. Además se pudo apreciar una baja influencia de la vegetación en el transporte del trazador.

Se pudo concluir que el método de aforo químico presenta problemas de aplicabilidad para cauces y caudales grandes, debido a los equipos y personal necesario. Se pudieron analizar temas de mezcla, donde se vio la conveniencia de inyectar el trazador en zonas de escurrimiento de torrente y en lo posible en lugares con resaltos que favorezcan la mezcla. No fue posible validar las metodologías aplicadas para la estimación de la recarga de un acuífero, debido a problemas con los equipos. Se recomienda la experimentación con otros equipos y trazadores, así como la realización de experiencias en cauces con mayores caudales y dimensiones.

*A mi Madre, Padre y Hermanos...*

# INDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | INTRODUCCIÓN.....   | 7  |
| 2.    | DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE AFORO .....   | 10 |
| 2.1.  | Introducción.....   | 10 |
| 2.2.  | Métodos de Aforo Basados en la Medición del Área y la Velocidad del Flujo. .... | 10 |
| 2.2.1 | Calculo del área de escurrimiento. ....   | 10 |
| 2.2.2 | Instrumentos para la medición de la velocidad del flujo.....                    | 12 |
| 2.2.3 | Cálculo de la velocidad media.....  | 19 |
| 2.2.4 | Curvas de igual velocidad. ....   | 21 |
| 2.3.  | Canaletas con Secciones de Control.....   | 22 |
| 2.3.1 | Canaletas de entrada larga con secciones de control.....                        | 23 |
| 2.3.2 | Canaletas de entrada corta con sección de control. ....                         | 24 |
| 2.3.3 | Canaleta Parshall .....   | 25 |
| 2.4.  | Aforo con Vertederos. ....  | 27 |
| 2.4.1 | Tipos de vertederos.....  | 27 |
| 2.4.1 | Consideraciones para vertederos de pared delgada.....                           | 31 |
| 2.4.2 | Errores en el cálculo del caudal con vertederos. ....                           | 31 |
| 2.5.  | Método Químico.....   | 32 |
| 2.5.1 | Aforo químico con inyección instantánea.....                                    | 32 |
| 2.5.2 | Aforo químico con inyección constante.....                                      | 33 |
| 2.6.  | Curva de Descarga.....  | 34 |
| 3.    | MÉTODOS DE AFORO QUÍMICO. ....  | 37 |
| 3.1.  | Introducción.....   | 37 |
| 3.2.  | Tipos de Trazadores. ....   | 37 |
| 3.2.1 | Sales.....  | 38 |
| 3.2.2 | Tintas colorantes.....  | 40 |
| 3.2.3 | Tintas fluorescentes.....   | 40 |
| 3.2.4 | Trazadores radioactivos.....  | 41 |
| 3.3.  | Metodologías de Aforo.....  | 42 |
| 3.3.1 | Método de inyección instantánea. ....   | 42 |
| 3.3.2 | Inyección constante. ....   | 46 |
| 3.3.3 | Método del tiempo de viaje.....   | 49 |
| 3.4.  | Consideraciones sobre los Métodos de Aforo con Trazadores.....                  | 51 |
| 3.4.1 | Pérdida de trazador.....  | 51 |
| 3.4.2 | Turbiedad del agua.....   | 52 |
| 3.4.3 | Mezcla completa.....  | 52 |
| 3.4.4 | Definición del punto de medición.....   | 54 |
| 3.5.  | Resumen.....  | 56 |
| 4.    | RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LABORATORIO.....                                   | 59 |
| 4.1.  | Introducción.....   | 59 |
| 4.2.  | Instalación Experimental.....   | 59 |
| 4.2.1 | Canal del laboratorio de fluidodinámica.....                                    | 59 |
| 4.2.2 | Conductivímetro Schott LF5100.....  | 60 |
| 4.2.3 | Conductivímetro portátil Multi 340i.....  | 60 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 4.2.4   | Conductivímetro PASCO CI-6739A.....   | 60  |
| 4.3.  | Metodología.....  | 61  |
| 4.3.1   | Medición del caudal.....  | 61  |
| 4.3.2   | Análisis de la mezcla del trazador.....   | 62  |
| 4.4.  | Curva de Calibración.....   | 62  |
| 4.5.  | Aforo mediante Inyección Instantánea.....   | 64  |
| 4.6.  | Mezcla del Trazador.....  | 69  |
| 4.6.1   | Aspectos generales.....   | 69  |
| 4.6.2   | Cambio del punto de medición a lo largo del canal.....                                | 69  |
| 4.6.3   | Medición de las curvas de respuesta en el centro y en la zona lateral del canal... .. | 73  |
| 4.6.4   | Análisis del cambio del punto de inyección.....                                       | 77  |
| 4.7.  | Análisis de Resultados.....   | 83  |
| 5.  | EXPERIENCIAS EN TERRENO.....  | 86  |
| 5.1.  | Aspectos Generales.....   | 86  |
| 5.1.1   | Descripción del lugar.....  | 86  |
| 5.1.2   | Instrumentos.....   | 90  |
| 5.2.  | Detalle de las Experiencias.....  | 91  |
| 5.2.1   | Experiencias con molinete y cálculo del caudal.....                                   | 92  |
| 5.2.2   | Aforo químico.....  | 95  |
| 5.3.  | Análisis de Resultados.....   | 99  |
| 6.  | COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.....   | 103 |
| 6.1.  | Resultados y Conclusiones.....  | 103 |
| 6.2.  | Comentarios y Recomendaciones.....  | 105 |
| 7.  | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 107 |
|   |   |     |
| ANEXO A. EXPERIENCIAS EN LABORATORIO.....         |   | 110 |
| A.1   | Introducción.....   | 110 |
| A.2   | Instrumentación.....  | 110 |
| A.2.1   | Canal del laboratorio de fluidodinámica.....  | 110 |
| A.2.2   | Conductivímetros.....   | 111 |
| A.2.3   | Balanza.....  | 113 |
| A.3   | Descripción Teórica.....  | 114 |
| A.4   | Experiencias en Laboratorio.....  | 116 |
| A.4.1   | Curva de calibración.....   | 116 |
| A.4.2   | Verificación de la calibración de la placa orificio del canal.....                    | 120 |
| A.4.3   | Concentración medible en las experiencias.....  | 122 |
| A.4.4   | Cálculo de caudales y variación del punto de medición.....                            | 124 |
| A.4.5   | Medición de las curvas de respuesta en el centro y en la zona lateral del canal.....  | 128 |
| A.4.6   | Análisis del cambio del punto de inyección.....                                       | 135 |
| A.5   | Análisis de resultados y conclusiones preliminares.....                               | 141 |
|   |   |     |
| ANEXO B. DATOS DE AFOROS QUÍMICOS EN TERRENO..... |   | 143 |

---

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso que siempre ha estado ligado al desarrollo del mundo, ya que todos los procesos biológicos, sociales y económicos han estado relacionados con éste en cierta medida. A modo de ejemplo podemos nombrar: producción de alimentos, energía, industria, transporte, entre otros. El escenario global es cada vez más complejo, debido a la falta de fuentes de agua de calidad para abastecer a una población creciente y a un proceso productivo en aumento. Los recursos subterráneos formados por acuíferos constituyen fuentes inestimables de almacenamiento de agua, así como medios para el abastecimientos de ésta (Asano, 1993).

En Chile, el agua subterránea ha pasado a convertirse en una fuente importante para ciertas regiones, especialmente en la zona norte. Según la literatura (Carlos Salazar, 2003), las estimaciones de utilización efectiva a nivel nacional indican que alcanza a unos 88 [m<sup>3</sup>/s], donde el 49% se utiliza para riego, el 35% para abastecimiento de agua potable y el 16% para fines industriales. Es importante destacar que desde la Región Metropolitana hacia el norte la recarga media se estima en 55 [m<sup>3</sup>/s], en tanto que los derechos de agua autorizados alcanzan a 107 [m<sup>3</sup>/s], con un uso efectivo de 60 [m<sup>3</sup>/s]. Dado este escenario se hace indispensable la realización de estudios que permitan una correcta administración del agua disponible, de forma de permitir un manejo eficiente y responsable de este recurso.

La administración de acuíferos solo puede ser posible si se tiene un conocimiento adecuado sobre los procesos que influyen en la cantidad y calidad del agua disponible. Uno de los procesos que es necesario evaluar para entender el funcionamiento de estas reservas es la recarga desde la superficie, la cual puede producirse por distintos fenómenos. Uno de los más importantes es la recarga desde cauces superficiales por medio de la infiltración.

Existen diferentes métodos para estimar esta recarga, los cuales van desde ecuaciones empíricas a mediciones en terreno y modelos computacionales. Uno de estos métodos se realiza por medio de la comparación de los caudales pasantes en distintas secciones de un cauce, siendo la recarga la diferencia entre ellos. La validez de este procedimiento depende de la exactitud con la cual se estiman los caudales, ya que en muchos casos los errores producidos son comparables con las estimaciones de la recarga, lo cual invalida los resultados.

El objetivo más importante de este Trabajo de Título fue analizar distintos métodos de aforo, de forma de poder analizar sus ventajas y desventajas. Será tratado con más profundidad el método de aforos químicos con trazadores en cauces superficiales, ya que en teoría sería entregaría un nivel de exactitud adecuado, y se analizará su aplicación para la estimación de la recarga de un acuífero por medio de aforos diferenciales. El trazador que se pretende evaluar es el Cloruro de Sodio, el cual presenta, entre sus principales ventajas, lo económico y accesible, su sencilla manipulación, un fácil de almacenamiento y transporte, entre otros.

Los objetivos específicos de este Trabajo de Título fueron los siguientes:

- Recopilar información general relacionada a distintos métodos de aforos y sus principales fuentes de error.
- Implementar en laboratorio un método de medición de caudales con trazadores y extender el método anterior a situaciones más generales.
- Desarrollar experiencias en terreno para poder analizar el funcionamiento del método propuesto.

Este trabajo consta de cinco capítulos además de la introducción. En el Capítulo 2 se presentan distintos métodos de aforo, como son: vertedero, canaleta, molinete, tubo de Pitot, entre otros. Con esta descripción se pretende presentar las ventajas y limitantes de cada uno de estos sistemas. El Capítulo 3 presenta una descripción detallada de los métodos químicos de aforo, mostrando las distintas metodologías y los distintos requerimientos para su correcta aplicación. El Capítulo 4 presenta los distintos análisis hechos en las instalaciones de laboratorio, siendo algunos de los temas tratados los siguientes: la masa de trazador a inyectar, el largo de mezcla completa, entre otros. La idea principal de este capítulo es familiarizarse con el método propuesto, de forma de lograr una correcta aplicación en terreno. El Capítulo 5 describe el lugar y las actividades que se realizaron en terreno. Por último en el Capítulo 6 se discuten las conclusiones y recomendaciones obtenidas luego del desarrollo de este trabajo.



---

**CAPÍTULO 2**  
**DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE AFORO**

---

## **2. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE AFORO**

### **2.1. Introducción.**

Para medir el caudal en un cauce es necesario definir una sección de control, en la cual podrán ser aplicados distintos procedimientos de medición. Entre ellos encontramos métodos relacionados con la medición de la velocidad y el área de escurrimiento, la construcción de obras que imponen condiciones conocidas de escurrimiento en una sección específica, las cuales permiten una rápida determinación del caudal, y métodos relacionados con la inyección de trazadores y la realización de balances de masa en distintas secciones.

En este capítulo se pretende describir algunos de los distintos métodos con los cuales se puede estimar el caudal pasante, así como identificar algunas ventajas y desventajas de cada método. Se describirán procedimientos para medir la velocidad, como flotadores, molinetes, tubos de Pitot, trazadores, etc. También se hará una caracterización sobre algunas construcciones en secciones de control, como: canaletas de entrada corta, donde la más importante es la canaleta Parshall, y canaletas de entrada larga. Por último se hará una introducción a los métodos de aforo químico, sin embargo éstos serán descritos con más detalle en el Capítulo 3.

### **2.2. Métodos de Aforo Basados en la Medición del Área y la Velocidad del Flujo.**

Una forma de medir el caudal pasante en un cauce es a través de mediciones independientes de la velocidad media del flujo,  $v$ , y del área de escurrimiento,  $A$ . Es importante notar que la velocidad considerada es aquella que es normal al área, por lo que al existir componente tangenciales de magnitud importante se cometen errores que afectan los aforos. Considerando lo anterior se puede obtener el caudal a través de la siguiente relación:

$$Q = A \cdot v \quad (2.1)$$

donde:

A: área de la sección de aforo.

v: velocidad media de escurrimiento.

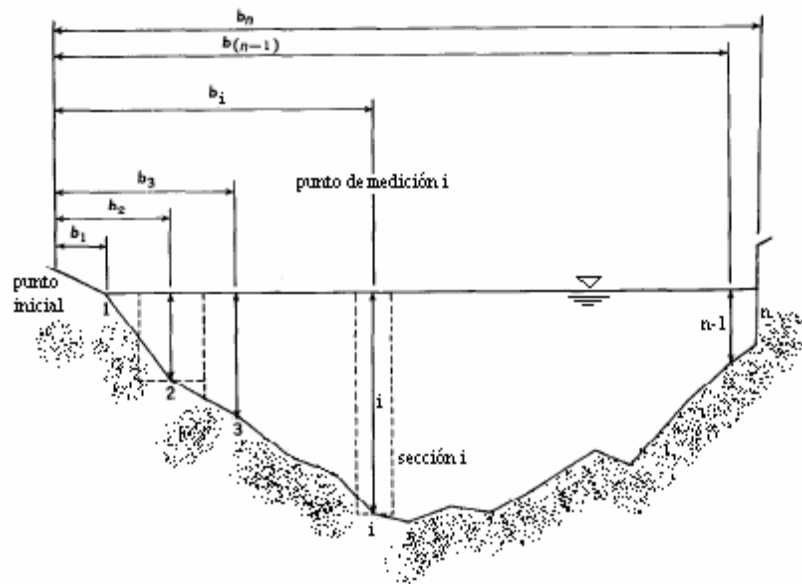
#### **2.2.1 Cálculo del área de escurrimiento.**

En caso de que las secciones de aforo sean pequeñas se utiliza la velocidad media, cuyo cálculo se explicará en el Capítulo 2.1.3, y el área completa de escurrimiento. Generalmente la forma de medir el caudal es en forma discreta, dividiendo la sección de control en distintas subsecciones y obteniendo la velocidad y el área en cada una de ellas. Sin embargo es posible utilizar instrumentos perfiladores, como: ADCP (Sensores Doppler Acústicos), los cuales permiten obtener el perfil de velocidades en la sección. En el caso de mediciones discretas se medirá, para cada una de las subsecciones, el área  $A_i$  y la velocidad media de la subsección  $v_i$ , con lo cual se tendrá:

$$Q_{total} = \sum Q_i = \sum v_i \cdot A_i \quad (2.2)$$

Cada una de las subsecciones es definida desde la mitad de la distancia hacia el punto de medición anterior y hasta la mitad de la distancia hacia el punto de medición posterior (ver Figura 2.1).

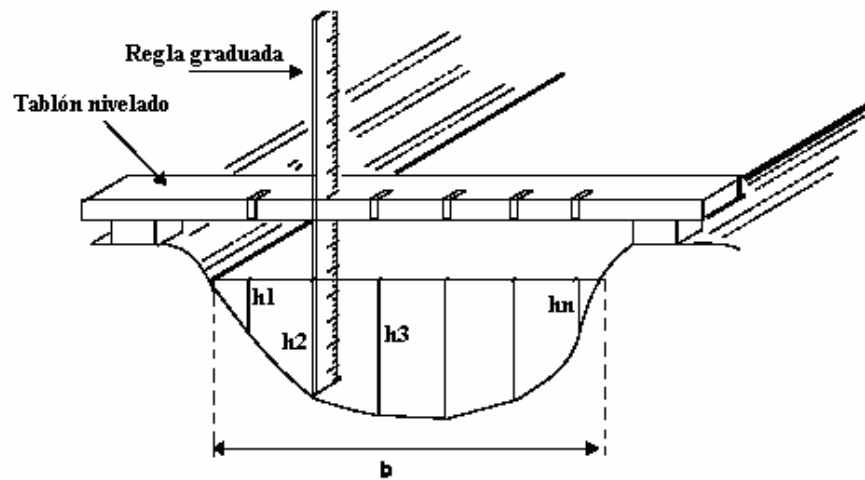
**Figura 2.1:**  
**Definición de subsecciones en un canal.**



Los puntos de medición se determinan de forma que sean equidistantes unos de otros. Mientras más puntos se usen más exacto será el resultado obtenido, sin embargo habrá que hacer más mediciones, con el consecuente incremento de los tiempos de medición.

Para poder estimar cada una de las áreas de las subsecciones se debe determinar, con la mayor exactitud posible, la profundidad del lecho en los distintos puntos de medición definidos. Cada una de las subsecciones se puede aproximar como un trapecio para fines prácticos, sin embargo es recomendable realizar un perfil transversal del cauce en el punto de medición, de tal forma de poder conocer de forma precisa la sección de aforo (ver Figura 2.2).

**Figura 2.2:**  
**Medición de la altura de escurrimiento en cada subsección.**



Finalmente la sección de aforo puede ser obtenida utilizando la siguiente expresión:

$$A = \sum_{i=1}^n h_i \cdot b_i \quad (2.3)$$

## 2.2.2 Instrumentos para la medición de la velocidad del flujo.

A continuación se describirán las características de los principales instrumentos para medir velocidades en un cauce. Estas herramientas permiten la medición de la velocidad en un punto de una sección, sin embargo, a través de la aplicación de ciertas metodologías definidas, es posible obtener la velocidad media del flujo midiendo en varios puntos en la zona de control. Estos métodos serán descritos en el Capítulo 2.1.3.

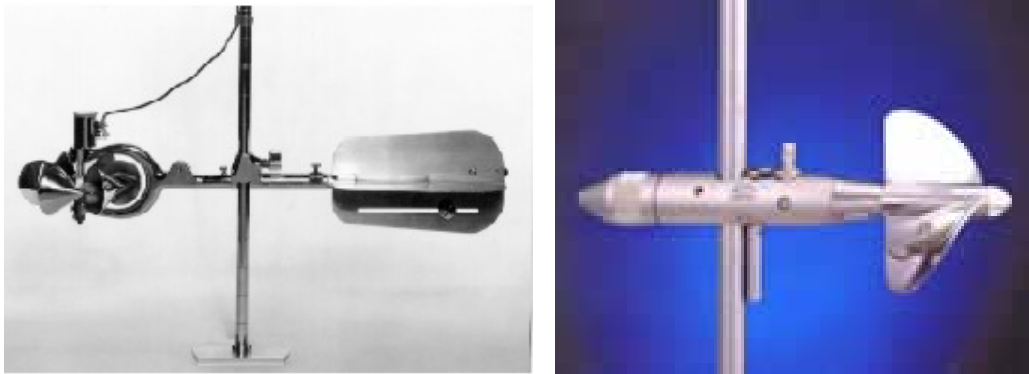
### 2.2.2.1 Molinete.

Para medir la velocidad de escurrimiento en un punto puede utilizarse un molinete, el que está provisto, en su versión más simple, de una hélice o una rueda de cazoletas montadas sobre un eje horizontal.

El molinete envía, por cada vuelta o número de vueltas predeterminado del eje, un impulso eléctrico que es transmitido al operador o a un contador automático, el cual se encarga de registrar el número de impulsos por unidad de tiempo. Cada molinete se entrega con una curva del tipo  $v = f(n)$ , la cual relaciona el número medido de impulsos con la velocidad del flujo en el punto controlado. Estos molinetes ofrecen una buena precisión para velocidades de corriente entre 0,2 y 5,0 m/s.

En la Figura 2.3 se pueden ver algunos ejemplos de estos tipos de molinetes:

**Figura 2.3:**  
**Fotos de molinetes.**



También existen instrumentos de medición más robustos, como el molinete electromagnético, que no tiene componentes móviles y va encerrado en una cápsula con forma hidrodinámica para resistir mejor la fuerza de la corriente. Es más compacto que el de hélice y resulta apropiado para medir velocidades muy pequeñas, para las que los molinetes de hélice dan resultados muy erráticos. Su menor vulnerabilidad al atoramiento los hace muy atractivos en caso de cauces muy contaminados o por los que circula mucho moho, algas o cualquier tipo de vegetación. Un ejemplo de estos molinetes se puede verse en la Figura 2.4:

**Figura 2.4:**  
**Foto de un molinete electromagnético.**



Para medir la velocidad escurrimiento en ríos medianos y grandes se cuelga el molinete de un puente o bote anclado en las dos orillas, lastrándolo para que no sea arrastrado por la corriente y haciendo que se mantenga en la vertical del observador. En caso de que el cauce sea más pequeño, el molinete puede ser manejado por el mismo operador, el cual podría ubicarse en el interior de la corriente. Hay que tener en consideración que para tener medidas de velocidad lo más exactas posibles, éstas no deben ser influenciadas o distorsionadas por ningún tipo de

elemento, como por ejemplo: pilares intermedios de un puente, ubicación incorrecta del operador al ubicar el molinete en el flujo, falta de verticalidad del molinete, entre otros. Entre las principales fuentes de error al medir con un molinete encontramos:

- **Errores instrumentales:** incluyen errores en la determinación de la velocidad a partir de la calibración del instrumento, ya que la calibración se realiza en condiciones diferentes.
- **Errores metodológicos:** considera la angularidad entre el escurrimiento y la sección de medida, la presencia de elementos extraños en el flujo (vegetación, elementos en suspensión, etc.), falta de verticalidad del molinete con el fondo del cauce, entre otros.
- **Errores del operador:** estos errores están asociados al manejo del equipo, como contar mal el número de revoluciones de la hélice y no seguir las consideraciones básicas descritas para cada instrumento.
- **Errores de muestreo:** se refiere a una insuficiente cantidad de medidas de velocidad y a una incorrecta elección de la sección de aforo.

#### 2.2.2.2 *Perfilador Acústico Doppler (ADP).*

Los ADP son instrumentos que permiten medir la velocidad del agua a través de un principio físico conocido como Doppler. Si se tiene una fuente de impulsos sonoros que se mueve con respecto a un receptor, la frecuencia del impulso en el receptor sería distinta a la original debido al desplazamiento, lo cual puede ser expresado con la Ecuación 2.4:

$$F_f = -2 \cdot F_i \cdot \frac{V}{C} \quad (2.4)$$

donde:

$F_i$ : frecuencia original emitida por la fuente.

$F_f$ : cambio en la frecuencia producida por el efecto Doppler.

$V$ : velocidad relativa entre la fuente y el receptor.

$C$ : velocidad del sonido.

Según lo anterior, la fuente fija emite un pulso con una frecuencia conocida, la cual viaja a través del agua hasta que es interceptada por alguna partícula, ya sean: sedimentos, burbujas, etc. El pulso es reflejado en todas direcciones, sin embargo parte del pulso viaja de vuelta y es captado por la fuente emisora, donde es posible cuantificar el cambio de frecuencia y, por lo tanto, la velocidad relativa. De esta forma, el efecto Doppler reflejaría la velocidad del flujo en el eje del impulso sonoro.

Las mediciones se hacen durante un periodo de tiempo en el cual es computado el cambio de frecuencia promedio. Además las mediciones pueden hacerse a distintas profundidades, de

forma de poder obtener un perfil de velocidades en el flujo. Dependiendo del objetivo de las mediciones, existen instrumentos que permiten obtener mediciones en 3D (ver Figura 2.5) y 2D (ver Figura 2.6). Esto se logra emitiendo impulsos sonoros en distintas direcciones y luego proyectando las velocidades obtenidas en los ejes axiales correspondientes. Para que las proyecciones de la velocidad sean exactas, los instrumentos pueden estar dotados con sensores que permite conocer de forma precisa la orientación del impulso.

**Figura 2.5:**  
**ADP para mediciones en 3D.**

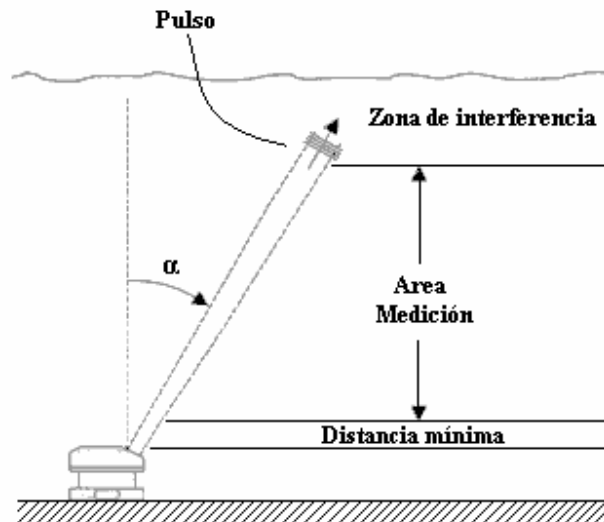


**Figura 2.6:**  
**ADP para mediciones en 2D**



Según las características de los instrumentos, la frecuencia del impulso y las partículas presentes en el agua, es posible construir perfiles de velocidades para distintos rangos de profundidades y con distintas resoluciones. Además existe una distancia mínima entre la fuente y la partícula en movimiento a partir de la cual es posible obtener mediciones (ver Figura 2.7). En la Tabla 2.1 es posible ver un ejemplo de estas relaciones:

**Figura 2.7:**  
**Características de la medición.**



**Tabla 2.1:**  
**Ejemplo de características de instrumentos ADP (Sontek Instruments).**

| Frecuencia [MHz] | Rango posible de medir [m] | Resolución máxima [m] | Distancia mínima [m] |
|------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|
| 3                | 3 - 6                      | 0,15                  | 0,2                  |
| 1,5              | 15 - 25                    | 0,25                  | 0,4                  |
| 1                | 25 - 35                    | 0,4                   | 0,5                  |
| 0,5              | 70 - 120                   | 1                     | 1                    |
| 0,25             | 160 - 220                  | 2                     | 2                    |

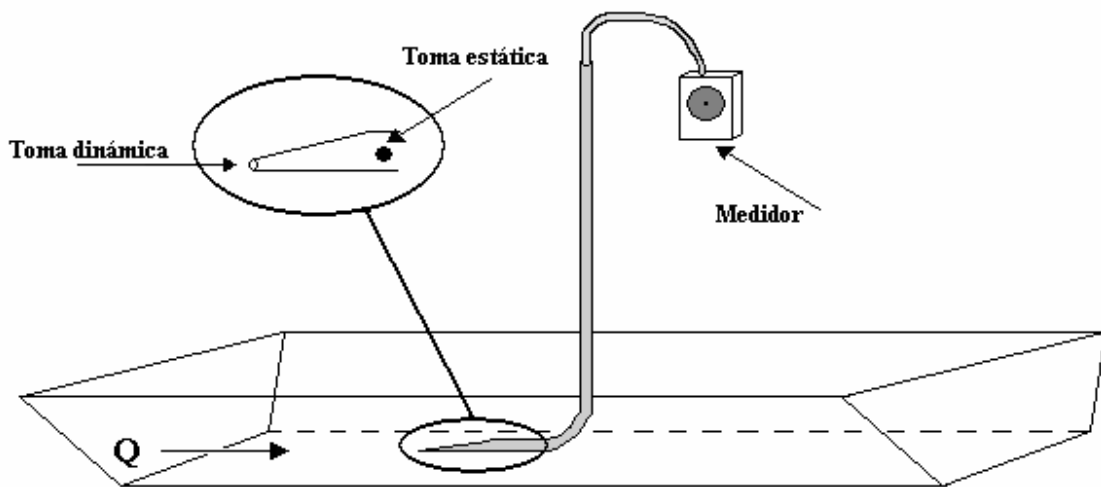
En las mediciones hechas con estos instrumentos la mayor parte de la energía en un pulso tiene una dirección conocida, sin embargo una pequeña parte de esta energía es emitida en todas direcciones lo que, al ser captado por el receptor, puede generar interferencias en las mediciones. Estas interferencias pueden generar errores en el perfil de velocidades de hasta un 10%.



### 2.2.2.3 Tubo Pitot.

El tubo de Pitot es un instrumento que permite medir la velocidad del flujo en un punto determinado. En su forma más básica, este sistema de medición consiste en un tubo abierto en sus dos extremos y doblado en uno de ellos. Cuando la parte doblada es introducida en el agua contra la corriente se logra que toda la energía cinética se transforme en energía en presión dentro del tubo. Además tiene unas perforaciones en los costados de la parte doblada del tubo, con lo cual se mide la energía estática del flujo (ver Figura 2.8).

**Figura 2.8:**  
**Esquema de un tubo Pitot.**



De la teoría elemental del tubo de Pitot se tiene que la velocidad medida del flujo puede ser expresada como sigue (Streeter, 1971):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (2.5)$$

donde:

v: velocidad.

g: gravedad.

$h_1$  y  $h_2$ : alturas dinámica y estática respectivamente.

Algunas fuentes de error de las mediciones con tubo de Pitot son las siguientes: posición angulada del tubo con respecto a la dirección del flujo, perturbaciones del escurrimiento en el punto de medición, presencia de burbujas de aire en el instrumento, entre otros.

#### 2.2.2.4 Flotadores

Un flotador puede ser cualquier cosa que flota y que es visible en la superficie, es decir: madera, botellas, naranjas, etc. Si bien los flotadores no son muy usados para la estimación del caudal debido a la falta de exactitud de los resultados, pueden ser de mucha utilidad en caso de emergencias cuando se necesitan estimaciones rápidas. Sin embargo es importante que este método sea utilizado solo en el caso que no exista la posibilidad de utilizar un sistema convencional.

Para la utilización de flotadores se deben elegir dos secciones de control, las cuales deben estar ubicadas en un tramo lineal, sin olas en la superficie y que presente una sección que sea lo más uniforme posible a lo largo del cauce. Estas áreas de escurrimiento en las secciones de control, así como algunas secciones intermedias, deben ser medidas de forma de poder calcular una área promedio de escurrimiento. La distancia entre las secciones de control debe ser definida luego de una inspección visual del lugar y del flujo, de forma que el tiempo de viaje permita una buena caracterización de la velocidad, sin que se incurra en tiempos de medición excesivos.

Para hacer las mediciones se debe ubicar una serie de flotadores distribuidos a lo ancho del cauce. Estos deben ser ubicados aguas arriba de la primera sección de control, de forma que al pasar por ella estén viajando con la velocidad del flujo. En ciertas ocasiones los flotadores no podrán ser ubicados a lo ancho del cauce debido a la falta de infraestructura, como puentes o botes, o a un ancho muy grande del cauce, entre otros. Esto hará que sea imposible ubicar flotadores en la parte central del flujo, con lo que las mediciones perderán toda exactitud.

Al utilizar un flotador para estimar la velocidad del flujo se estará midiendo la velocidad superficial en el cauce en la línea de corriente respectiva. Debido a esto será necesario utilizar un factor  $k$  que transforme esta velocidad en velocidad media según el perfil vertical de velocidades. El valor que debe tomar este coeficiente  $k$  se puede ver en la tabla 2.2. La velocidad media del flujo estimada a partir de un flotador podrá ser calculada de la siguiente forma:

$$v = k \cdot \frac{L}{t} \quad (2.6)$$

donde:

- v: velocidad media del flujo en la vertical.
- k: coeficiente de transformación.
- L: distancia entre las secciones de control.
- t: tiempo de viaje entre secciones de control.

**Tabla 2.2:**  
**Valor del coeficiente K para flotadores según la profundidad del flujo (Water Measurement Manual, 2001).**

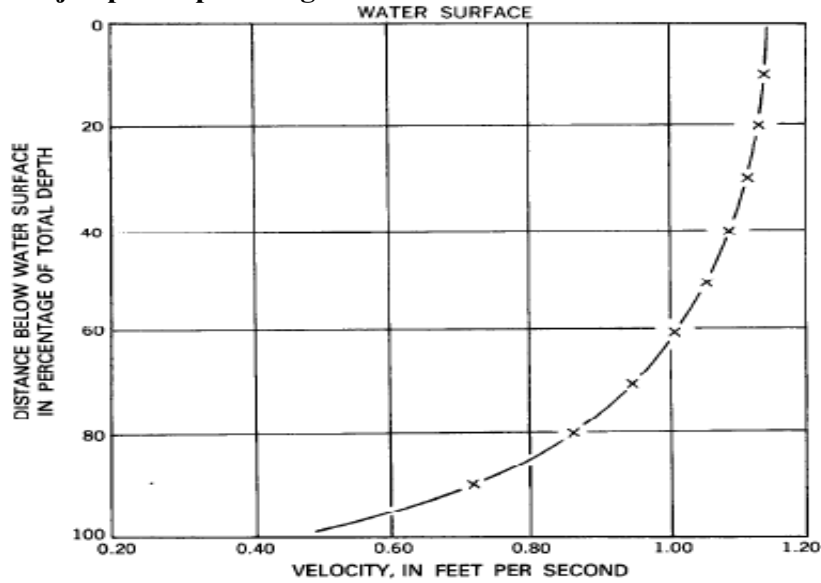
| Profundidad promedio del flujo [m] | Valor del coeficiente k. |
|------------------------------------|--------------------------|
| 0,31                               | 0,66                     |
| 0,61                               | 0,68                     |
| 0,92                               | 0,7                      |
| 1,22                               | 0,72                     |
| 1,53                               | 0,74                     |
| 1,83                               | 0,76                     |
| 2,75                               | 0,77                     |
| 3,66                               | 0,78                     |
| 4,58                               | 0,79                     |
| >6,1                               | 0,8                      |

El método de estimación de velocidades con flotadores puede entregar, si las condiciones son favorables, resultados con errores de hasta 10 %. Entre los factores que pueden influir en la exactitud de las estimaciones encontramos: el viento, la falta de precisión en la elección del coeficiente k, variaciones de la profundidad del flujo a lo largo del tramo, flujos oblicuos, falta de uniformidad de la sección a lo largo del tramo, entre otros. Si la estimación de la velocidad del flujo se hace en condiciones desfavorables se pueden obtener errores de más del 30%.

### **2.2.3 Cálculo de la velocidad media.**

El cálculo de la velocidad media esta en estricta relación con el instrumento utilizado. Los ADP permiten obtener un valor de la velocidad media a partir del perfil de velocidades medido y los flotadores permiten estimarla a partir de coeficientes empíricos, sin embargo la utilización de molinetes y tubos de Pitot obliga a hacer una serie de mediciones en la vertical para cada subsección definida, para lo cual es necesario seguir ciertas metodologías. Cada uno de los métodos se basa en interpretaciones del perfil de velocidades del cauce, siendo una importante fuente de error el asumir perfiles de velocidad no adecuados. En el caso que el canal sea prismático y suficientemente ancho, usualmente se considera suficiente cuando la relación entre el ancho y la altura de agua es 3:1, se pueden obtener perfiles logarítmicos de velocidad en el centro del canal, lo que define ciertos criterios para las mediciones. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 2.9 un perfil logarítmico de velocidades y en la Tabla 2.3 los coeficientes utilizables para obtener una estimación de la velocidad media a partir de mediciones hechas a diferentes alturas:

**Figura 2.9:**  
**Ejemplo de perfil logarítmico de velocidades en un canal.**



**Tabla 2.3:**  
**Ejemplo de la relación entre velocidad puntual y velocidad media para perfiles logarítmicos (Measurement and Computation of Streamflow Vol. 1).**

| Porcentaje de la profundidad total en el punto de medición [%] | Relación entre la velocidad a cierta profundidad y la velocidad media |
|--|---|
| 0.05   | 1.16  |
| 0.1  | 1.16  |
| 0.2  | 1.149   |
| 0.3  | 1.13  |
| 0.4  | 1.108   |
| 0.5  | 1.067   |
| 0.6  | 1.02  |
| 0.7  | 0.953   |
| 0.8  | 0.871   |
| 0.9  | 0.746   |
| 0.95   | 0.648   |

Entre las metodologías más importantes para la estimación de la velocidad media del flujo encontramos las siguientes:

- **Método de los dos puntos:** Este método considera mediciones a los 0.2 y 0.8 de la profundidad del lecho. Para obtener la velocidad media en la vertical del punto de medición se promedian estos dos valores. Este método requiere una medición exacta de la profundidad y, si el perfil es logarítmico, puede entregar valores de velocidad media con un error menor o igual al 1% del valor real.

- **Método del sexto decil:** Este método considera una medición de velocidad a los 0.6 de la profundidad del lecho. Si vemos la Tabla 2.3 podemos ver que, para perfiles logarítmicos, a esta profundidad la velocidad se aproxima a la media, sin embargo no es exacta. Este método no es recomendado para profundidades muy bajas (<0.3 mts).
- **Método de los tres puntos:** Este método es usado cuando el perfil de velocidades tiene una forma no logarítmica, haciendo que otros métodos no sean tan exactos. Se basa en la medición de la velocidad a los 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad del lecho. Para el cálculo de la velocidad media se promedia la velocidad a los 0.2 y 0.8 y luego este valor es promediado con la velocidad a los 0.6. Si se le quiere dar más peso a los valores medidos a 0.2 y 0.8 del fondo del cauce se puede hacer el promedio aritmético entre los tres valores.
- **Método del segundo decil:** Este método se usa cuando las velocidades del cauce son muy grandes y es muy difícil medir la velocidad a ciertas profundidades. Se mide la velocidad a los 0.2 de la profundidad del lecho y se aplica un factor de corrección para obtener la velocidad media (ver Tabla 2.3). En caso de conocer el perfil de velocidades, puede ser posible establecer una relación entre la velocidad media real y la velocidad medida a los 0.2 de la profundidad del lecho en distintas situaciones, de tal forma de encontrar un factor más adecuado a cada caso.
- **Método de la velocidad superficial:** Con este método se mide la velocidad superficial del cauce y se utiliza un factor para estimar la velocidad media. En cauces naturales se usa generalmente un coeficiente de 0.85 o 0.86, mientras que en cauces artificiales se usa 0.9.
- **Método de los cinco puntos:** Según este método se mide la velocidad en la superficie, a los 0.2, 0.6, 0.8 y en el fondo. La velocidad media es calculada usando la siguiente expresión:

$$V_{media} = 0.1 \cdot (V_{superficie} + 3 \cdot V_{0.2} + 3 \cdot V_{0.6} + 2 \cdot V_{0.8} + V_{fondo}) \quad (2.7)$$

Este método tiene la dificultad de la medición de la velocidad en el fondo y en la superficie, lo que puede generar errores importantes

- **Método de los seis puntos:** Este método es similar al anterior. La diferencia está en que se considera un punto más a los 0.4 de profundidad del lecho. La expresión para el cálculo de la velocidad media es la siguiente:

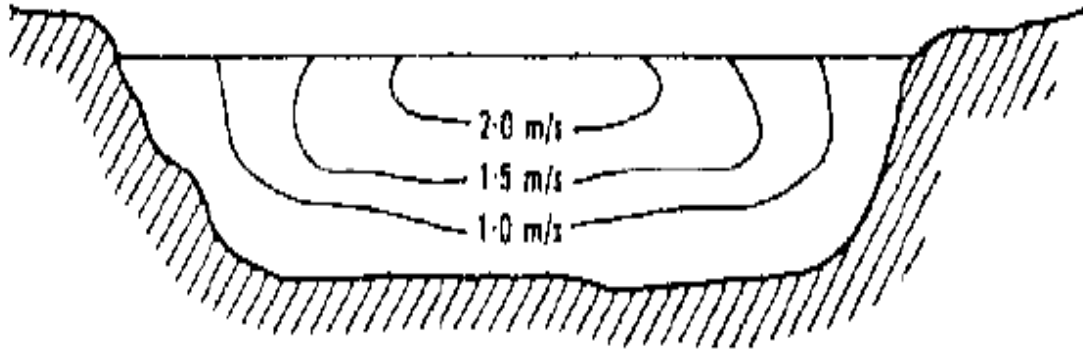
$$V_{media} = 0.1 \cdot (V_{superficie} + 2 \cdot V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.4} + 2 \cdot V_{0.6} + 2 \cdot V_{0.8} + V_{fondo}) \quad (2.8)$$

## 2.2.4 Curvas de igual velocidad.

Es posible construir, para una sección de aforo, una serie de curvas de igual velocidad o isovelas, las cuales se obtienen midiendo la velocidad a distintas alturas y en todo el largo de la sección (ver Figura 2.10). Con esto se puede determinar el volumen de agua que está pasando entre curvas, multiplicando la velocidad media entre isovelas por el área comprendida entre las

dos curvas correspondientes. Al sumar todos los volúmenes de agua que están pasando por la sección por unidad de tiempo se obtiene el caudal total.

**Figura 2.10:**  
**Ejemplo de isovelas en una sección de medición.**



### 2.3. Canaletas con Secciones de Control.

Existen obras estandarizadas que permiten imponer ciertas condiciones al escurrimiento, de forma que sea simple la determinación del caudal pasante. Estas secciones de control permiten aforar a través de un diseño que fuerza al flujo a alcanzar una altura crítica de escurrimiento, con lo que se puede obtener una estimación del caudal de manera simple sabiendo la forma de la sección de escurrimiento. Este fenómeno se logra por medio del angostamiento de la sección de escurrimiento, la elevación del fondo del canal o por una combinación de ambos. Según lo anterior será posible construir una curva de gasto (ver Capítulo 2.6) haciendo una curva que relacione el caudal pasante con la altura de escurrimiento.

Estas canaletas pueden variar en tamaño desde 3 [cm] de ancho hasta más de 15 [m]. Los caudales aforados pueden variar desde aproximadamente 1 [l/s] hasta 80 [m<sup>3</sup>/s], aunque en teoría no existen límites superiores. En algunos casos, como en crecidas o en situaciones en que la obra de control debe ser construida con un mínimo movimiento de tierra, las secciones de control de las canaletas son calibradas para funcionar con cierto grado de sumergencia en el sector de la altura crítica. Cuando existen altos niveles de sumergencia se hace necesario medir la altura de escurrimiento en dos puntos, ya que esta altura no es la crítica, lo que se traduce en una importante pérdida de exactitud.

Es importante destacar que las canaletas, al permitir un libre escurrimiento, no generan una acumulación de sedimentos significativa. Esta es una ventaja muy importante ya que otros dispositivos de aforo, como los vertederos, no tienen un buen funcionamiento en aguas con mucho arrastre sólido y pierden exactitud debido al cambio de la cota de fondo.

Existen diferentes tipos de canaletas con secciones de control diseñadas para aforar, entre las cuales se encuentran las que se describen a continuación.

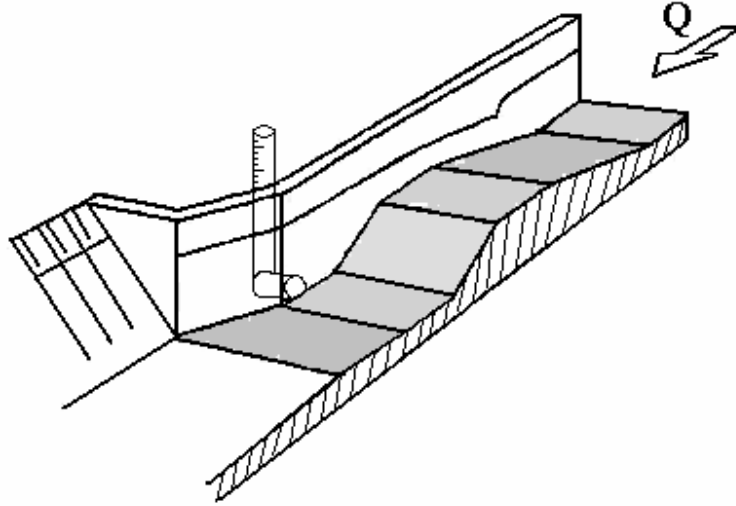
### **2.3.1 Canaletas de entrada larga con secciones de control.**

Este tipo de canaletas tienen una entrada del flujo lo suficientemente larga como para permitir que las líneas de flujo se ordenen casi paralelas en la zona de control. Este flujo paralelo permite que el caudal sea estimado de manera bastante precisa utilizando conceptos de la hidráulica, tales como: el principio de energía, la relación de la altura crítica con el caudal y la teoría de la capa límite.

**Figura 2.11:**  
**Canaletas de entrada larga (Water Measurement Manual, 2001).**



**Figura 2.12:**  
**Esquema de una canaleta de entrada larga.**



Entre las principales ventajas de este tipo de canaletas de aforo se encuentran las siguientes (Water Measurement Manual, 2001):

- Cuando no existe una sumergencia importante en la zona de altura crítica, se pueden conseguir curvas de gasto con errores no superiores al 2%.
- La sección de escurrimiento puede tener casi cualquier forma, siendo fácilmente adaptable a canales ya construidos y permitiendo mediciones precisas en todo el rango de aforo para el cual se diseñó.
- Pueden ser transformadas en dispositivos portátiles de manera simple y sin tantas complicaciones en su construcción.
- Debido a que la zona de convergencia del flujo es muy gradual, existen pocos problemas con desechos flotantes o con sedimentos. Algunas observaciones en terreno han mostrado que estas canaletas de aforo pueden ser diseñadas para permitir el paso de los sedimentos con un escurrimiento subcrítico.
- Bajo las mismas condiciones hidráulicas y otras condiciones de borde, este tipo de canaletas resultan más económicas que otras estructuras para aforar.

### **2.3.2 Canaletas de entrada corta con sección de control.**

Este tipo de canaletas tienen una entrada con líneas de flujo curvilíneas. A pesar de su corta entrada, éstas tienen en la parte final, incluyendo la transición, un largo que puede llegar a ser considerable, ya que en estas secciones se deben lograr ciertas condiciones de escurrimiento necesarias para una correcta medición del caudal. El ejemplo más claro de este tipo de canaletas



es la Parshall. Para realizar los aforos se necesitan calibraciones empíricas por comparación, por lo que se hace necesaria la utilización de otros sistemas de aforo que tengan una precisión adecuada.

**Figura 2.13:**  
**Canaleta de entrada corta (Water Measurement Manual, 2001).**



### **2.3.3 Canaleta Parshall**

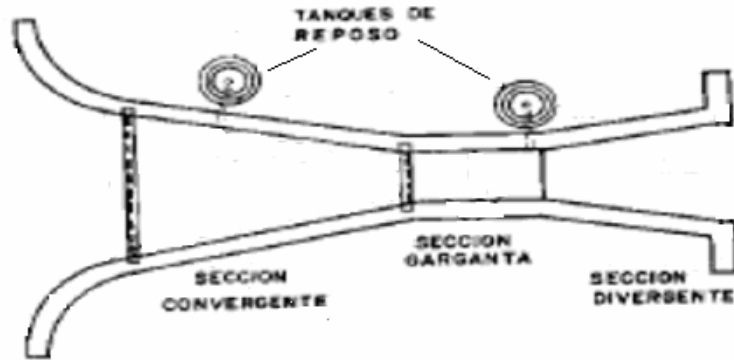
La canaleta Parshall se creó como un perfeccionamiento de un diseño anterior, conocido como Canaleta de Ventura. Este dispositivo tiene dimensiones y condiciones de instalación perfectamente definidas, las cuales pueden ser vistas en la literatura (ver Water Measurement Manual, 2001).

Este dispositivo consta de tres partes ubicadas en el siguiente orden:

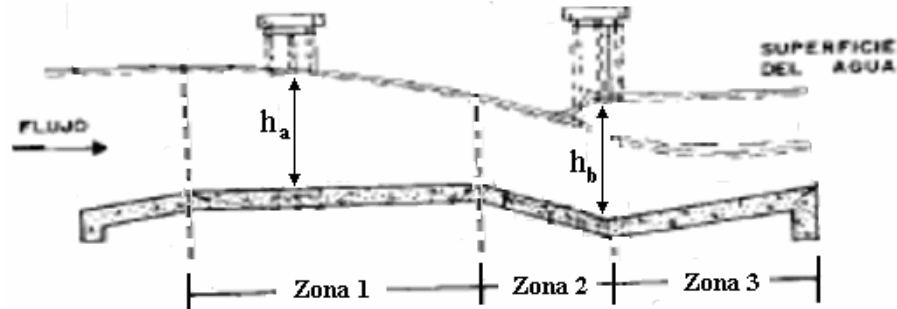
- Zona 1: sección convergente en contrapendiente con el flujo.
- Zona 2: sección estrecha con una pendiente a favor del flujo.
- Zona 3: sección divergente nuevamente en contrapendiente.

**Figura 2.14:**  
**Esquema de una canaleta Parshall.**

**Vista en Planta**



**Vista en Corte**



El diseño de este tipo de canaletas se hace principalmente a través del ancho de la zona 2, ya que permite imponer condiciones de flujo para alcanzar una altura crítica en esta sección. Dependiendo de la existencia de sumergencia en la zona 2 se tendrá mayor o menor exactitud en los aforos, siendo importante en casos de sumergencia el largo de la zona 3, ya que permite obtener ciertas relaciones entre el caudal y las mediciones de altura de escurrimiento en los tanques de reposo.

El grado de sumergencia puede ser calculado como porcentaje utilizando la siguiente expresión:

$$S = \frac{h_b}{h_a} \cdot 100 \quad (2.9)$$

donde:

S: grado de sumergencia

$h_b$ : altura del limnómetro en el tanque de reposo de la zona 2.

$h_a$ : altura del limnómetro en el tanque de reposo de la zona 1.

Utilizando la expresión anterior es posible definir ciertos criterios bajo los cuales la sumergencia influiría en la estimación del caudal. Si el ancho de la zona 2 es menor que 1 [pie] el grado de sumergencia debería ser mayor a 50% antes de que exista una influencia en las mediciones del limnómetro aguas arriba. Si el ancho de la zona 2 esta entre 1 [pie] y 8 [pie] el grado de sumergencia debe ser mayor que el 70% antes de influenciar aguas arriba. Por último, para canaletas Parshall con un ancho de la zona 2 mayor a 10 [pie] es necesario un grado de sumergencia del 80% (Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2, 1982).

Los aforos pueden ser realizados utilizando calibraciones empíricas, las cuales relacionan la altura de escurrimiento libre con el caudal. Es importante destacar que el dimensionamiento de este tipo de canaletas se hace principalmente a través del ancho de la zona 2. Para la estimación de los caudales se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$Q = C \cdot h^n \quad (2.10)$$

donde:

C, n: coeficientes de la curva de calibración.

h: altura de escurrimiento de la zona 2 [m].

Q: caudal [m<sup>3</sup>/s].

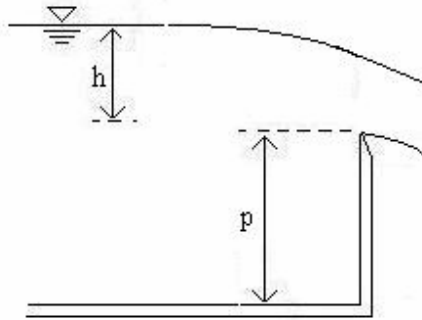
Los principales errores que se cometen al aforar con una Canaleta Parshall están relacionados con las mediciones hechas en los limnómetros. Si existe una oscilación grande del agua en los limnómetros no se podrán obtener valores de altura precisos, por lo que la estimación del caudal no será muy exacta.

## **2.4. Aforo con Vertederos.**

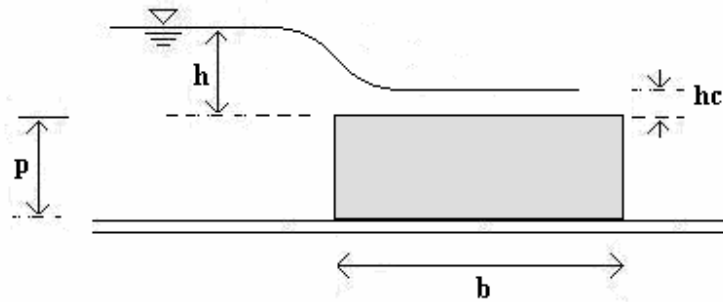
### **2.4.1 Tipos de vertederos**

Los vertederos son una de las estructuras de aforo en canales abiertos más antiguas. Son estructuras construidas perpendicular al eje del canal y que permiten el paso del flujo por la parte superior de la obra. Pueden ser clasificados según el largo de la sección de control, es decir, como vertederos de pared delgada (ver Figura 2.15) o de pared gruesa (ver Figura 2.16) y según la forma de la sección de control, ya sea rectangular, triangular, trapezoidal, etc.

**Figura 2.15:**  
**Vertedero de pared delgada.**



**Figura 2.16:**  
**Vertedero de pared gruesa.**



Para el aforo de los caudales es posible establecer, según la forma del vertedero, una única curva que relaciona la altura de agua “h” por sobre el vertedero con el caudal pasante. Es importante considerar una velocidad de aproximación del flujo al vertedero, ya que ésta influye en la calibración y en la medición de la altura de escurrimiento antes del vertedero. La altura de velocidad debe ser obtenida en el punto en el cual se hace la medición de la altura “h”, de forma que se obtiene lo siguiente:

$$h^* = \begin{cases} h; & \text{si la velocidad de aproximación es nula.} \\ h + \frac{v^2}{2g}; & \text{si existe velocidad de aproximación.} \end{cases}$$

donde:

$h^*$  : altura utilizada en las formulas de cada vertedero para el cálculo del caudal.

h: altura de escurrimiento medida aguas arriba del vertedero.

v: velocidad de aproximación al vertedero.

A continuación se describen los distintos vertederos y se entregan las ecuaciones para el cálculo del caudal:

- **Vertedero rectangular de pared delgada:** Existen dos tipos de vertederos rectangulares, los cuales se diferencian por la existencia de una contracción lateral del flujo al momento de pasar por la sección de control (ver Figura 2.17). Los vertederos donde el ancho de la obra es el mismo que el del canal, es decir, donde no existe contracción lateral, se conocen como vertederos Bazin y tienen un coeficiente  $\mu$  entre 0,4 y 0,45. Por otro lado, si existe contracción lateral del flujo debido a que el ancho del vertedero es menor que el del canal, el coeficiente  $\mu$  será algo menor. La ecuación para el cálculo del caudal será la siguiente:

$$Q = \frac{2}{3} \mu^* \cdot l \cdot h \cdot \sqrt{2gh} = \mu \cdot l \cdot h \cdot \sqrt{2gh} \quad (2.11)$$

donde:

Q: caudal.

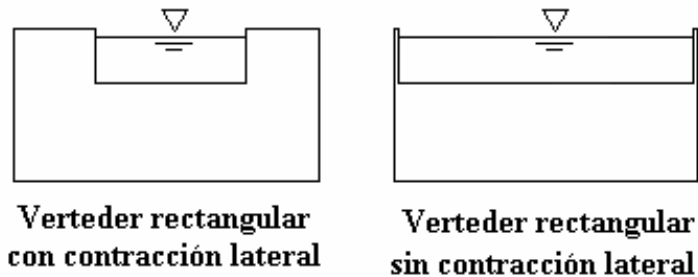
$\mu$ : coeficiente experimental relacionado con la forma del vertedero y con la contracción del flujo.

l: ancho del vertedero.

h: altura de agua sobre el vertedero.

g: gravedad.

**Figura 2.17:**  
**Tipos de vertederos rectangulares.**



- **Vertedero triangular de pared delgada:** Este tipo de vertedero tiene una sección triangular cuyo ángulo varía usualmente entre 45° y 90° (ver Figura 2.18). Es utilizado principalmente para medir caudales pequeños debido a que las variaciones de altura en el vertedero son fácilmente apreciables. El caudal se calcula con la fórmula de Gourley y Crimp:

$$Q = 1,32 \cdot tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h^{2,47} \quad (2.12)$$

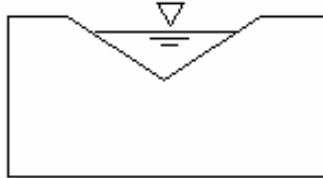
donde:

Q: caudal en m<sup>3</sup>/s.

h: altura sobre el vertedero en metros.

$\alpha$ : ángulo de abertura del vertedero triangular en grados.

**Figura 2.18:**  
**Vertedero triangular.**



**Vertedero triangular  
o V-notch**

▪ **Vertedero trapezoidal o Cipolletti:** Existen distintos tipos de vertederos trapezoidales, sin embargo el vertedero Cipolletti es el más común. En general este tipo de vertedero se caracteriza porque mantiene un  $\mu$  prácticamente constante con la carga.

En el caso del vertedero Cipolletti sus dimensiones cumplen con  $\frac{1}{a} = \frac{1}{4}$  (ver Figura 2.19).

El caudal puede ser calculado con la ecuación descrita a continuación:

$$Q = 0,415 \cdot L \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.13)$$

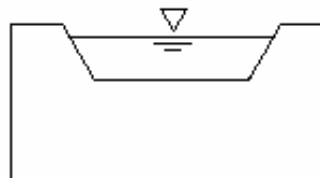
donde:

Q: caudal en [m<sup>3</sup>/seg].

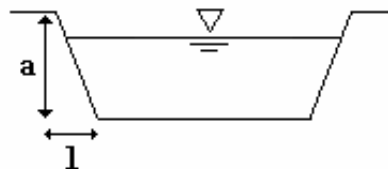
L: ancho de la base del vertedero en [m].

h: altura sobre el vertedero en [m].

**Figura 2.19:**  
**Vertedero trapezoidal.**



**Vertedero  
trapezoidal**



**Vertedero  
Cipolletti**

- **Vertedero de pared gruesa:** Este tipo de vertedero es usado principalmente para grandes caudales, ya sea en ríos o canales. La forma que puede tener este tipo de obras es generalmente rectangular o trapezoidal y el coeficiente  $\mu$  puede variar entre 1,5 y 2,0. La ecuación que permite el cálculo del caudal es la siguiente:

$$Q = \mu \cdot L \cdot h^{3/2} \quad (2.14)$$

donde:

Q: caudal en [m<sup>3</sup>/seg].

L: ancho de la base del vertedero en [m].

h: altura sobre el vertedero en [m].

#### 2.4.1 Consideraciones para vertederos de pared delgada.

Ciertos requerimientos básicos son necesarios para una correcta utilización de los vertederos, así como para asegurar un nivel adecuado de exactitud en los aforos. A continuación se describen algunos de ellos (Water Measurement Manual, 2001):

- La cara del vertedero aguas arriba del flujo debe ser recta, lisa y perpendicular al eje del canal.
- La cresta de los vertederos debe estar libre de irregularidades.
- El ancho del vertedero de pared delgada debe tener como máximo 3 [mm] y debe ser regular en todo el perímetro de éste. Es importante no considerar vertederos demasiado filosos debido a los problemas de seguridad y a la facilidad con la cual se deterioran.
- Se debe considerar una diferencia de altura entre el borde del vertedero y la altura de agua bajo éste de al menos 7 [cm]. Además se debe asegurar que el salto de agua no este en contacto con la pared del vertedero, de forma que exista una ventilación bajo este salto.
- La medición de la altura de agua sobre el vertedero debe hacerse a una distancia aguas arriba de éste suficiente como para asegurar que no hay interferencia. En el caso de vertederos de pared delgada, esta altura de agua por sobre el vertedero debe ser medida a una distancia aguas arriba de al menos 5 veces “h”, mientras que para vertederos de pared gruesa la medición debe hacerse a una distancia de al menos 2,5 veces “h”.
- Es muy importante mantener la zona del canal aguas arriba del vertedero libre de sedimentos, de forma de no incurrir en errores.

#### 2.4.2 Errores en el cálculo del caudal con vertederos.

En las Tablas 2.4 y 2.5 se puede ver un ejemplo de los errores promedio en los que se incurre al aforar con dos tipos de vertederos de pared delgada distintos, uno rectangular (Bazin) y otro triangular de 45° (Custodio, 1983):

**Tabla 2.4:  
Errores en el caudal en vertedero Bazin.**

| Caudal [m <sup>3</sup> /seg] | Ancho [m] | Carga aproximada [cm] | Error al medir la carga |          |         |         |
|------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|----------|---------|---------|
|                              |           |                       | =0,03 cm.               | 0,15 cm. | 0,3 cm. | 1,5 cm. |
| 14                           | 0,3       | 8                     | 0,5                     | 2,7      | 5,5     | 27,3    |
| 28                           | 0,6       | 8                     | 0,5                     | 2,7      | 5,5     | 27,3    |
| 70                           | 0,6       | 16                    | 0,3                     | 1,5      | 3       | 14,7    |
| 140                          | 1,5       | 13                    | 0,3                     | 1,7      | 3,4     | 17      |
| 280                          | 1,5       | 21                    | 0,2                     | 1,1      | 2,1     | 10,6    |
| 700                          | 1,5       | 40                    | 0,1                     | 0,6      | 1,1     | 5,6     |

**Tabla 2.5:  
Errores en el caudal en vertedero triangular de 45°.**

| Caudal [m <sup>3</sup> /seg] | Carga aproximada [cm] | Error al medir la carga |          |         |         |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------|---------|---------|
|                              |                       | 0,03 cm.                | 0,15 cm. | 0,3 cm. | 1,5 cm. |
| 1,4                          | 6                     | 1,2                     | 6,1      | 12,2    |         |
| 2,8                          | 8                     | 0,9                     | 4,6      | 9,1     |         |
| 14                           | 16                    | 0,5                     | 2,4      | 4,8     | 23,8    |
| 28                           | 21                    | 0,4                     | 1,8      | 3,6     | 18      |
| 70                           | 30                    | 0,3                     | 1,2      | 2,5     | 12,4    |
| 140                          | 40                    | 0,2                     | 0,9      | 1,9     | 9,3     |
| 280                          | 53                    | 0,1                     | 0,7      | 1,5     | 7,3     |

## 2.5. Método Químico.

Estos métodos se basan en la variación de la concentración que tiene una solución al ser vertida en el cauce que se está intentando aforar y tienen como condición básica la mezcla completa en la sección de control y un caudal constante. De acuerdo al tipo de vertido de la solución se pueden identificar dos tipos de aforo químico: con inyección instantánea y con inyección constante.

A continuación se presenta una breve introducción sobre estos métodos de aforo. El detalle es posible verlo en el Capítulo 3.

### 2.5.1 Aforo químico con inyección instantánea.

Este método se basa en la idea de verter instantáneamente una solución de concentración  $C'$  y volumen  $V$ , con lo cual se tiene que la masa del elemento químico o trazador vertido sería:

$$M = C' \cdot V \quad (2.15)$$



Una vez que el trazador ha sido vertido en el cauce se genera una nube, la cual viaja con el flujo según los fenómenos de advección y dispersión. Luego de esperar que la nube de trazador recorra la distancia en la cual ocurre la mezcla completa en la sección, se puede definir un punto de medición en donde se tomarán muestras a intervalos constantes de tiempo  $\Delta t$ . Al hacer un gráfico de la concentración medida en cada muestra versus el instante de tiempo en que fue tomada la muestra se obtendrá una curva con forma de campana, lo que reflejará que la mayor cantidad de trazador se encuentra en el centro de la nube, disminuyendo su cantidad hacia los extremos de ésta.

El área bajo esta curve mide el peso de trazador que fue arrojado al cauce. De esta forma se puede definir la siguiente expresión:

$$M = \int C \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.16)$$

Además, asumiendo que la condición básica de mezcla completa en la sección se cumple y que se tiene  $x = v \cdot t \Rightarrow dx = v \cdot dt$ , donde  $v$  es la velocidad media en el tramo, es posible obtener una expresión para el cálculo del caudal, como la que se muestra a continuación:

$$\Rightarrow M = A \cdot v \cdot \int C \cdot dt \quad (2.17)$$

$$\Rightarrow Q = \frac{M}{\int C \cdot dt} \approx \frac{M}{\Delta t \cdot \sum C} \quad (2.18)$$

Según la ecuación anterior es necesario medir la concentración de trazador en varios puntos de la curva y a intervalos de tiempo constantes, de forma de poder calcular el área bajo la curva y, por ende, el caudal pasante, ya que la masa de trazador químico vertido es conocida.

### 2.5.2 Aforo químico con inyección constante.

Para aforar con este método se inyecta el trazador en el cauce a régimen constante utilizando una bomba pequeña, un frasco de Mariotte, un inyector de nivel constante u otro. Al inyectar en régimen constante la solución de trazador en el cauce, se produce, luego de dejar que la nube recorra la distancia necesaria para la mezcla completa, una concentración de equilibrio. Es posible escribir un balance de masa en un volumen de control definido entre el punto de inyección y el de control luego de alcanzar la concentración de equilibrio, el cual tiene la siguiente forma:

$$Q \cdot C_0 + q \cdot C_1 = (Q + q) \cdot C_2 \quad (2.19)$$

$$\Rightarrow Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \quad (2.20)$$

donde:

Q: caudal del cauce.

$C_0$ : concentración de trazador natural en el cauce.

q: caudal de solución de trazador inyectada.

$C_1$ : concentración de trazador en la solución.

$C_2$ : concentración de equilibrio en el punto de medición.

Luego de que se alcance la concentración de equilibrio, será necesario medir la concentración de trazador en el cauce  $C_2$ , ya que el resto de las variables  $C_0$ ,  $C_1$  y  $q$  son conocidas o medibles.

Para realizar este tipo de aforo es indispensable que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que en el punto de medición la ecuación de balance de masa sea válida, es decir, que se alcance la concentración de equilibrio luego de la mezcla completa.
- Que el caudal de inyección  $q$  se mantenga constante.

## 2.6. Curva de Descarga.

Un método convencional empleado en ríos grandes y medianos consiste en medir el la velocidad y la sección de escurrimiento, de tal forma de poder obtener una relación entre el caudal y la altura del flujo. Para ello hay que contar con una estación de aforo, aguas abajo de un tramo recto de longitud razonable, en lo que se conoce como sección de control. Dicha relación se denomina “*curva de descarga*” de una estación de aforo y se esquematiza por la siguiente relación:

$$\left. \begin{array}{l} A = f(h) \\ v = f(h) \end{array} \right\} \Rightarrow Q = f(h)$$

donde:

A: área de la sección de escurrimiento.

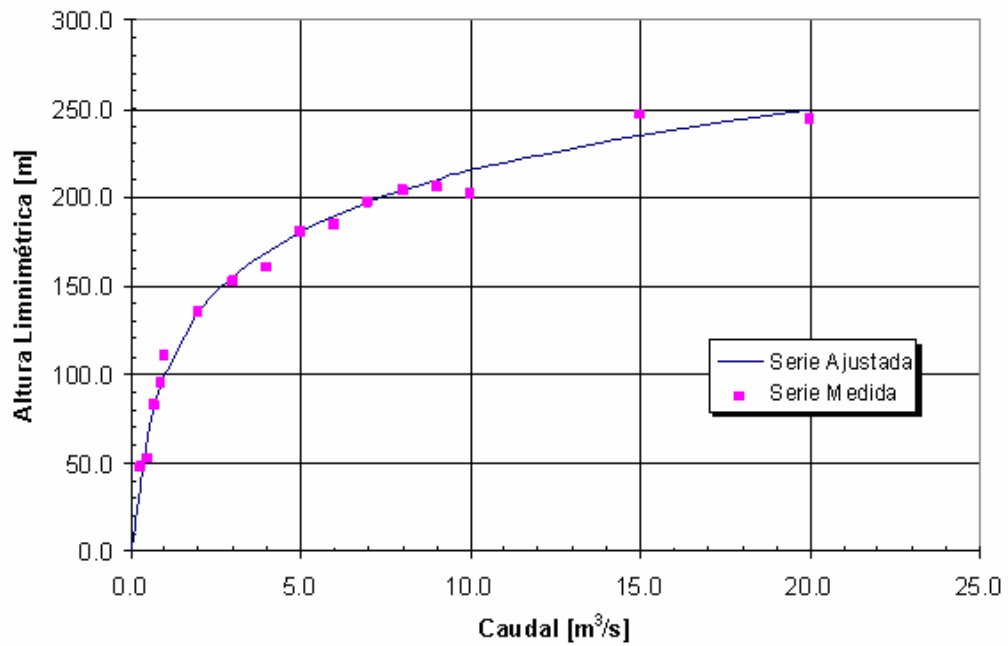
v: velocidad del flujo.

h: altura del escurrimiento en un punto de medición.

En una estación de aforos, lo que se mide y registra es la altura de agua en la sección y a lo largo del tiempo. Para ello, en su versión más simple, se utiliza una regla graduada en metros y centímetros, y en versiones más modernas se utilizan mediciones automáticas.

Es común empezar por construir el tramo de la curva correspondiente a los caudales bajos, sin embargo para situaciones especiales, como crecidas, se necesitan datos de caudal para alturas no utilizadas en la fabricación de la anterior curva de descarga. Para la obtención de estos datos se extrapola la curva de acuerdo a distintos criterios, entre los cuales están el de Manning y el de la expresión analítica de la curva resultante (Espíldora, 1975). Un ejemplo de la forma de la curva de gasto se puede apreciar en la Figura 2.20:

**Figura 2.20:**  
**Ejemplo de una curva de descarga.**



---

**CAPÍTULO 3**  
**MÉTODOS DE AFORO QUÍMICO**

---

### **3. MÉTODOS DE AFORO QUÍMICO.**

#### **3.1. Introducción.**

El aforo a través de trazadores puede ser muy útil debido a que presenta ciertas ventajas con respecto a otros sistemas de medición. Entre las situaciones en que este método presenta ventajas se destacan:

- Cauces en que la velocidad del flujo es muy grande o que presentan mucha turbulencia, ya que bajo estas condiciones se hace muy difícil utilizar un molinete u otro instrumento convencional de aforo.
- Cauces que, debido a sus condiciones, son inaccesibles para la aplicación de métodos de aforo convencionales.
- Cauces en que, al utilizar sistemas de aforo convencionales, presentan tiempos de medición excesivos.
- Si los métodos con trazadores se aplican correctamente, presentan un nivel de exactitud mayor al de otros métodos de aforo.

Existen distintos tipos de trazador, entre los cuales encontramos: sales, tintas y elementos radioactivos. Cada uno de ellos presenta ciertas ventajas y desventajas, lo que permite definir bajo que condiciones es más adecuada la utilización de uno por sobre los demás. A continuación se describen cada uno de ellos.

#### **3.2. Tipos de Trazadores.**

Un trazador puede ser cualquier cosa que se mezcle o viaje con el agua de un cauce, y que pueda ser detectado. Dependiendo del trazador utilizado, existirán distintas formas para detectarlos, ya sea midiendo la concentración de forma directa, es decir, midiendo directamente la concentración de trazador en el agua, o de forma indirecta, donde se mide un parámetro específico, como: conductividad, pH, etc. y se relaciona con la concentración del trazador.

Para que una sustancia sea utilizada como trazador debe cumplir con ciertos requisitos mínimos, tales como: ser seguro y fácil de manejar, ser fácilmente detectable, tener un efecto despreciable sobre la flora y fauna, tener una tendencia a la adsorción nula, tener un decaimiento fotoquímico despreciable, ser estable químicamente, ser económicamente viable, ser fácilmente soluble en el agua del cauce, se debe encontrar en cantidades pequeñas en condiciones naturales, entre otras. Es claro que no existe un trazador que cumpla todas las condiciones a la perfección, sin embargo se busca que el trazador seleccionado cumpla de manera aceptable estos requisitos. Algunos de los trazadores que pueden ser utilizados se describen a continuación:

### 3.2.1 Sales.

Entre las distintas sales utilizables la más común es el Cloruro de Sodio, debido a que es fácil de conseguir y es económicamente accesible. En general son más utilizadas para el método de inyección instantánea. El método de inyección constante con sal resulta muchas veces impracticable debido a las grandes cantidades de sal que se deben manejar para poder hacer las experiencias.

Una forma de medir la curva de respuesta del trazador en el cauce es a través del peso seco de sal en un volumen conocido, lo cual se logra evaporando el agua de la muestra tomada. Sin embargo la forma más común de medir la curva de respuesta de la sal en el cauce es a través del cambio en la conductividad eléctrica del agua a medida que la nube de trazador avanza con el flujo. Este aumento de la conductividad se mide con un conductivímetro y, por medio de un coeficiente de transformación, se pasa de conductividad en concentración (ver Ecuación 3.1). Para poder hacer esta transformación es necesario calcular el coeficiente por medio de la creación de una curva de calibración, la cual se fabrica usando datos de conductividad medidos en distintas muestras con concentraciones conocidas. De esta forma se puede obtener una relación con la siguiente forma:

$$\text{Concentración} = k \cdot \text{Conductividad} \quad (3.1)$$

Como los cambios de temperatura influyen en la medida de conductividad hecha, es necesario hacer la transformación a concentración a una temperatura fija, pasando las medidas hechas en las experiencias, que pueden haber sido hechas a cualquier temperatura, a sus valores equivalentes según la temperatura fijada anteriormente, de modo que todas sean comparables. Según lo anterior, la temperatura fijada para la comparación y para los cálculos se recomienda en 20° C. Para poder transformar las medidas de conductividad hechas a distintas temperaturas a una conductividad a 20° C se recomienda utilizar la Ecuación 3.2 (Olivares, 2000):

$$\text{Cond}_{.20^{\circ}\text{C}} = \text{Cond}_{.T} \cdot [1 - b \cdot (T - 20)] \quad (3.2)$$

donde:

Cond: conductividad eléctrica

b: coeficiente de transformación que varía con la temperatura.

T: temperatura.

El coeficiente b es función de la temperatura de medición y debe ser obtenido utilizando los valores de la Tabla 3.1 (Olivares, 2000):

**Tabla 3.1:**  
**Valor del coeficiente b para corrección de conductividad por temperatura.**

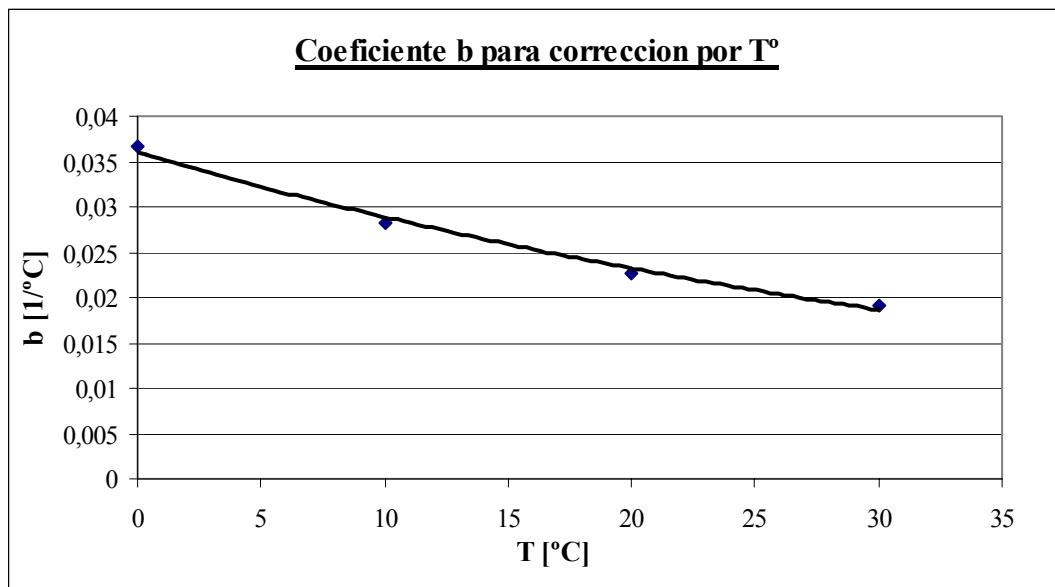
| Temperatura [°C] | b [1/°C] |
|------------------|----------|
| 0                | 0,03675  |
| 10               | 0,02817  |
| 20               | 0,02277  |
| 30               | 0,01905  |

Ajustando una curva a los puntos anteriores (ver Figura 3.1) se puede ver que el mejor ajuste se logra utilizando la siguiente expresión:

$$b(T^\circ) = 0,0359 \cdot e^{(-0,0218 \cdot T^\circ)}$$

$$R^2 = 0,992$$

**Figura 3.1:**  
**Curva ajustada para el coeficiente b para corrección de conductividad por temperatura.**



Finalmente se recomienda que el punto de medición no presente una turbulencia importante, ya que el conductivímetro puede presentar problemas de medición cuando hay muchas burbujas de aire.

La cantidad de sal que se debe utilizar en una experiencia de inyección instantánea varía según las condiciones de flujo del canal, el largo de mezcla necesario para alcanzar una mezcla óptima, la presencia de vegetación, el peak de conductividad que se desea medir en el punto de medición, entre otros. En el caso del Cloruro de Sodio, se recomienda usar entre 2 y 5 [kg ] de sal por cada 1 [m<sup>3</sup>/s] a aforar. Es importante tener en cuenta que existe una concentración de

saturación, por lo que la cantidad mínima de solución a inyectar está limitada por este valor y por la cantidad de masa necesaria para el aforo.

### **3.2.2 Tintas colorantes.**

El análisis con tintas se realiza principalmente por análisis colorimétrico, el cual analiza la absorción de luz que existe en la muestra. El colorímetro es calibrado a través de la utilización de una muestra patrón y la medición en este instrumento puede ser transformada a concentración si se ha realizado una correcta correlación, en la mayoría de los casos lineal, entre la lectura del instrumento y la concentración de colorante.

Una de las principales tintas usadas es el Dicromato de Sodio, el cual tiene un color anaranjado rojizo. Esta tinta puede ser tóxica y existen límites máximos de Cromo en el agua, por ejemplo, en el caso del agua potable, se exigen niveles inferiores a 0,05 [mg/l].

### **3.2.3 Tintas fluorescentes.**

Los trazadores fluorescentes tienen la capacidad única de absorber luz de una cierta longitud de onda y emitir luz a otra, usualmente mayor. Pocos compuestos tienen esta capacidad, por lo que es muy difícil que se produzcan interferencias a la hora de medir. Algunos de los trazadores fluorescentes más comunes son: Fluoresceína, Pontancyl Rosado B, Rodamina B y Rodamina WT. Estos dos últimos han sido declarados no tóxicos por la U.S. Food and Drug Administration.

Para poder medir la fluorescencia de una muestra es necesario contar con un fluorómetro, los cuales miden la intensidad de la luz emitida. La medición del instrumento es directamente proporcional a la concentración de trazador fluorescente presente en la muestra y se puede medir con una exactitud de hasta 1 parte por billon (1  $\mu\text{g/l}$ ), mientras que puede ser detectada una concentración de hasta 1 parte por trillon (0,001  $\mu\text{g/l}$ ). Es importante considerar una corrección por temperatura en las mediciones hechas con el fluorómetro cuando la solución standard y las muestras tienen una temperatura diferente, ya que variaciones en la temperatura tienen un efecto importante en la intensidad de la fluorescencia. En caso de que sea necesario corregir el valor obtenido con el fluorómetro, se deberá multiplicar el valor obtenido por un factor dado según la diferencia de temperatura entre la solución estándar y la muestra. Los factores de corrección se pueden ver en la Tabla 3.2:



**Tabla 3.2:**  
**Factor de corrección para la variación de la fluorescencia.**

| Diferencia de temperatura [°C] | Coficiente de corrección |
|--------------------------------|--------------------------|
| -11,1                          | 1,36                     |
| -8,3                           | 1,25                     |
| -5,6                           | 1,16                     |
| -4,4                           | 1,13                     |
| -3,3                           | 1,09                     |
| -2,8                           | 1,08                     |
| -2,2                           | 1,06                     |
| -1,7                           | 1,05                     |
| -1,1                           | 1,03                     |
| -0,6                           | 1,02                     |
| 0                              | 1,00                     |
| 0,6                            | 0,99                     |
| 1,1                            | 0,97                     |
| 1,7                            | 0,96                     |
| 2,2                            | 0,94                     |
| 2,8                            | 0,93                     |
| 3,3                            | 0,91                     |
| 4,4                            | 0,89                     |
| 5,6                            | 0,86                     |
| 8,3                            | 0,80                     |
| 11,1                           | 0,74                     |

### 3.2.4 Trazadores radioactivos.

Comprenden los trazadores que pueden ser detectados por la radiación emitida luego de ser activado. Entre ellos podemos encontrar:  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{27}\text{Mg}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{113}\text{In}$ , entre otros.

La radiación posee una energía, longitud de onda y frecuencia tales que, al interactuar con un medio, le transfieren energía suficiente para separar a un electrón de su átomo. La radiación suele ser un fenómeno de la radiactividad, que procede de los átomos y está compuesta principalmente por partículas alfa, núcleos totalmente ionizados, beta, electrón libre que sale despedido de un átomo, y rayos gamma, tipo de radiación electromagnética producida por el choque de un electrón con un positrón a grandes velocidades. También es posible su aparición debido a la excitación de los electrones mediante el calor o la aplicación de campos electromagnéticos intensos, la cual se denomina rayos X. Para experiencias de aforo se utilizan principalmente los radioisótopos emisores de radiación gamma, ya que permiten una mayor y más fácil detección debido a la mayor penetración de la radiación en el medio que atraviesan.

El conteo de radioisótopos se realiza con un contador, el cual recibe la radiación y emite una señal eléctrica, la cual, al ser amplificada, puede ser identificada en una escala adecuada. Existen varios tipos de contadores tales como: Geiger, Müller, de centelleo, entre otros. El tipo de contador utilizado dependerá del tipo de radiación a detectar.

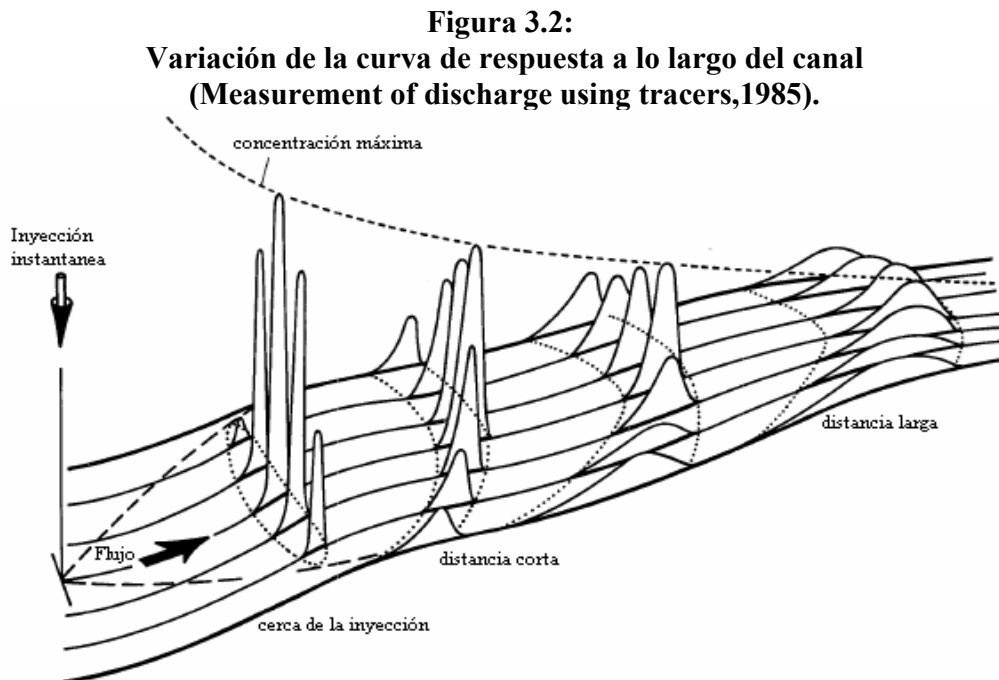
La principal ventaja de estos trazadores es que se necesitan volúmenes muy pequeños de trazador (1 parte por billón) frente al caudal pasante, pudiendo obtenerse medidas de gran precisión. Sin embargo presentan un problema importante, el cual tiene relación con el manejo de los radioisótopos, ya que es necesario contar con personal especialmente entrenado para el uso de esta técnica.

### 3.3. Metodologías de Aforo.

Existen dos metodologías de aforo con trazadores las cuales permiten determinar el caudal en un cauce. Estos son: método de inyección instantánea y de inyección continua. Además existen métodos con trazadores para la estimación la velocidad o tiempo de viaje del flujo. A continuación se describen cada uno de ellos:

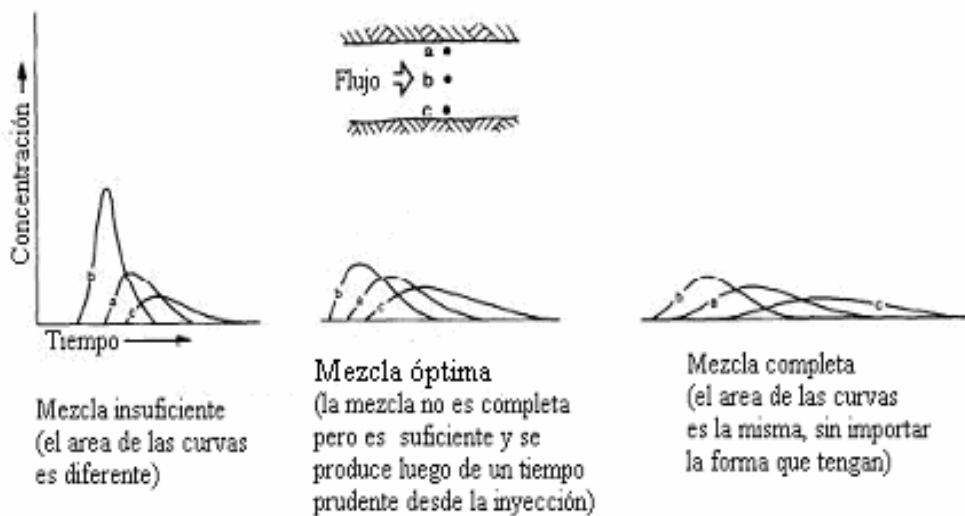
#### 3.3.1 Método de inyección instantánea.

Este método consiste en inyectar una cantidad conocida de masa de trazador en el flujo de un cauce de manera instantánea y luego medir el paso de la nube de trazador a través del tiempo. Si se grafica la concentración de trazador medida en un punto del cauce versus el tiempo en que estas mediciones fueron hechas, se puede obtener una curva conocida como curva de respuesta del trazador. En la figura 3.2 se pueden ver distintas curvas de respuesta que representan mediciones en distintos puntos a lo ancho y largo del cauce.



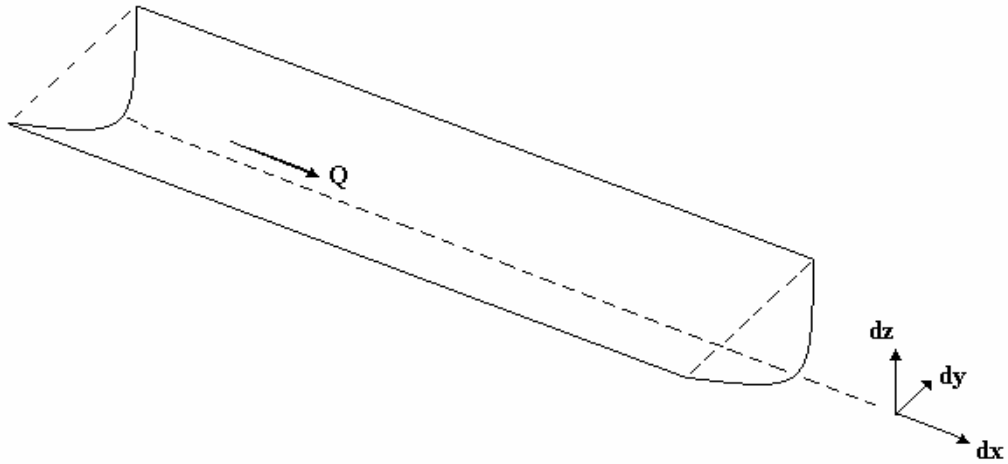
Luego de la inyección de trazador, la nube comienza a viajar con el flujo, dispersándose a lo ancho y largo de éste. Cuando la distancia entre el punto de inyección y el de medición es muy corta, es poco probable que se alcance la mezcla completa, por lo que las curvas medidas tendrían áreas distintas. A medida que el punto de medición se aleja del punto de inyección la mezcla comienza a ser mayor, con lo que las áreas de las curvas comienzan a ser similares, mientras que la forma de las curvas no necesariamente es la misma (ver Figura 3.2 y 3.3). Es importante destacar que el grado de mezcla completa esta asociada al área de la curva, mientras que la forma está asociada, entre otras cosas, a la velocidad del flujo y a la dispersión del trazador en el agua.

**Figura 3.3:**  
**Variación a la mezcla con inyección instantánea de trazador**  
**(Measurement of discharge using tracers,1985).**



El caudal puede ser calculado a partir del principio de la conservación de masa. Según esto se tiene que, si no hay pérdidas de trazador en el cauce, la masa de trazador inyectada sería igual a la masa presente en el canal. El volumen de control definido para ver la masa de trazador presente en el canal estaría definido por la sección del canal, lo que limita la dirección z e y, y por un tramo definido entre el  $-\infty$  y  $+\infty$  en la dirección x. Lo explicado anteriormente se puede escribir como se muestra en la Ecuación 3.3, teniendo presente que para obtener realmente la masa inyectada hay que descontar, a cada punto del volumen de control, la concentración base presente en el agua de forma natural.

**Figura 3.4:**  
**Volumen de control en el cauce.**



$$M = \int (C - C_b) \cdot dV = \iiint (C - C_b) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (3.3)$$

donde:

M: masa de trazador inyectada en el flujo.

C: concentración de trazador medida en cada punto del volumen de control.

$C_b$ : concentración inicial del trazador en el agua.

Si existe mezcla completa del trazador en la sección, no existe una variación de la concentración en la dirección  $z$  e  $y$ , por lo que la concentración no depende de estas variables. Esta es una condición básica para que esta metodología pueda ser aplicada. Este supuesto permite escribir la Ecuación 3.4, la cual se muestra a continuación:

$$\Rightarrow M = \iint dy \cdot dz \cdot \int (C - C_b) \cdot dx = A \cdot \int (C - C_b) \cdot dx \quad (3.4)$$

Haciendo un cambio de variable que relacione la distancia con el tiempo de viaje y con la velocidad del flujo se obtiene lo mostrado en la Ecuación 3.5. Es importante destacar que la velocidad se asume constante en la sección de control.

$$x = v \cdot t$$

$$dx = v \cdot dt$$

$$\Rightarrow M = A \cdot v \cdot \int (C - C_b) \cdot dt = Q \cdot \int (C - C_b) \cdot dt \quad (3.5)$$

donde:

v: velocidad de la nube de trazador en el cauce.

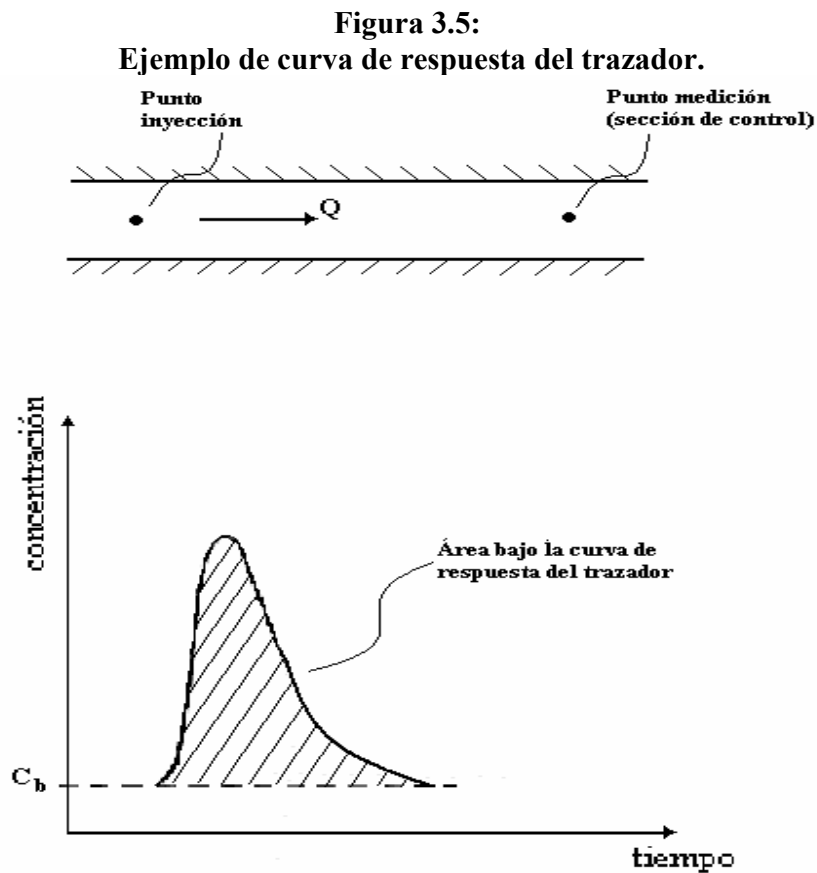
A: área de la sección.

Q: caudal del cauce.

Finalmente a partir de la ecuación anterior se puede obtener una expresión para el cálculo del caudal. Esto se muestra en la Ecuación 3.6:

$$\Rightarrow Q = \frac{M}{\int (C - C_b) \cdot dt} \quad (3.6)$$

Esta expresión final muestra que, si no hay pérdida de trazador en el cauce y si existe mezcla completa del trazador en la sección, es posible calcular el caudal midiendo, en cualquier punto del volumen de control, la variación de la concentración en el tiempo, de forma de obtener una curva como la que se muestra en la Figura 3.5:



En la práctica la concentración no puede ser medida en instantes de tiempo infinitamente pequeños, por lo que la integral puede ser aproximada como se muestra en la Ecuación 3.7:

$$\Rightarrow Q = \frac{M}{\int (C - C_b) \cdot dt} \approx \frac{M}{\sum (C_i - C_b) \cdot \Delta t_i} \quad (3.7)$$

donde:

$C_i$ : concentración del trazador medida en el instante  $i$ -ésimo.

$\Delta t$ : intervalo de tiempo entre cada medida de concentración de trazador en el agua.

Si el intervalo de tiempo en el cual se mide la concentración de trazador es constante se obtiene la siguiente expresión:

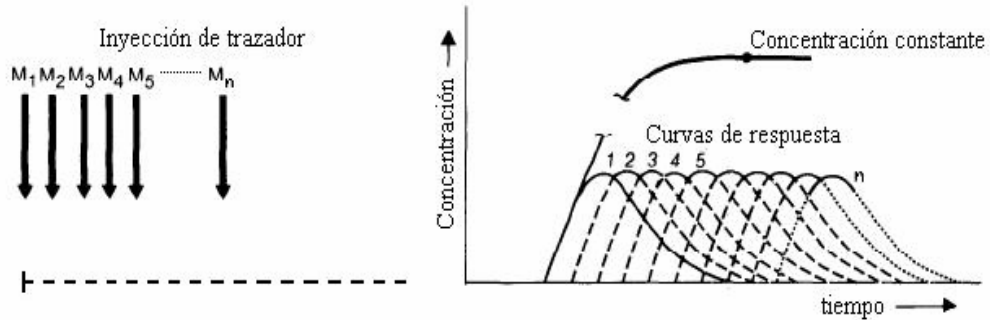
$$\Rightarrow Q \approx \frac{M}{\Delta t \cdot \sum (C_i - C_b)} \quad (3.8)$$

Para que los cálculos del caudal sean lo más exactos posible se debe contar con una buena caracterización del paso de la nube de trazador en el punto de medición. En ciertos casos la parte final de la nube puede tener un largo importante pero con concentraciones de trazador bajas, por lo que, si no se mide adecuadamente, se puede dejar de contabilizar una parte de la curva, con la consiguiente pérdida de exactitud en el aforo.

### 3.3.2 Inyección constante.

Para entender el funcionamiento del método de inyección constante es posible hacer una analogía con una serie de inyecciones instantáneas a intervalos de tiempo pequeños y constantes (ver Figura 3.6). La primera inyección instantánea  $M_1$  generará, en el punto de medición, una curva de respuesta 1. Asumiendo que el caudal del cauce es constante, cada una de las siguientes  $n$  inyecciones instantáneas generarán una curva de respuesta similar con lo que se producirá, aproximadamente a partir del punto donde termina la primera curva, una estabilización de la concentración en el cauce.

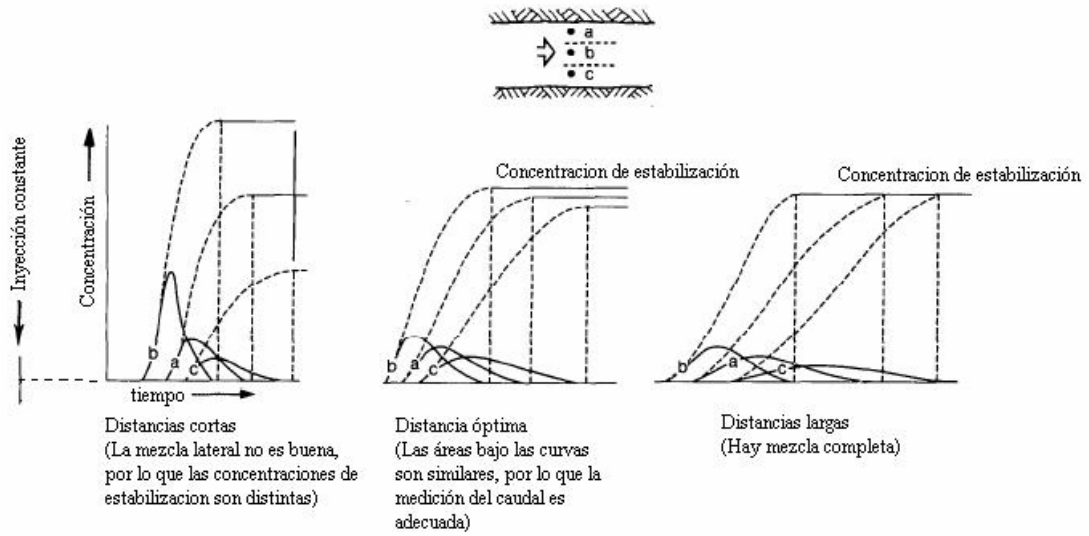
**Figura 3.6:**  
**Forma de la curva de respuesta con inyección constante**  
**(Measurement of discharge using tracers,1985).**



El método de inyección constante también necesita como condición básica que exista mezcla completa. En un punto de medición cercano al punto de inyección es poco probable que exista mezcla completa, por lo que las concentraciones de estabilización no serán iguales en las direcciones verticales y transversales del cauce. A medida que nos vamos alejando del punto de inyección la mezcla será mejor, tendiendo las concentraciones de estabilización a ser iguales (ver figura nº 3.7). La distancia necesaria para que se alcance la mezcla completa dependerá de las condiciones de escurrimiento, de la turbulencia, perfil de temperatura, etc.

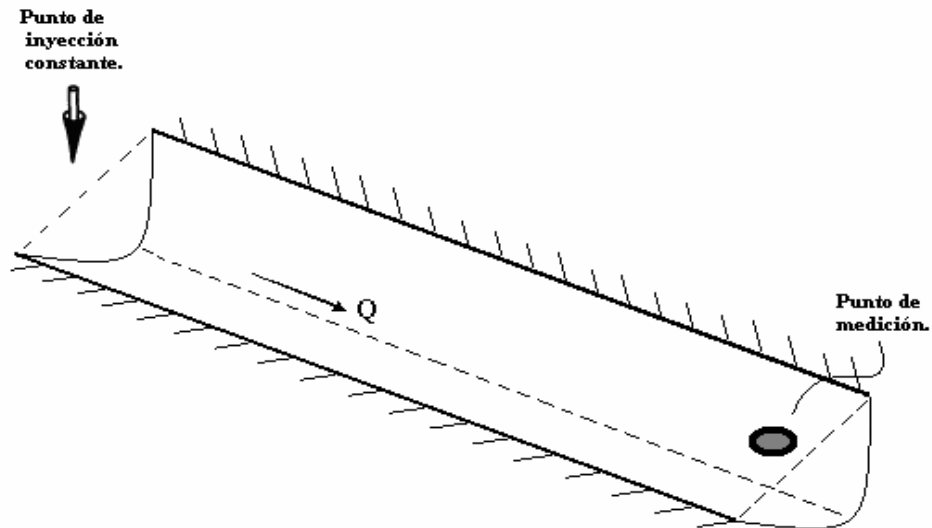
El tiempo mínimo de inyección está dado por el tiempo que demora la curva más alargada en alcanzar la concentración de estabilización, de manera que a lo ancho del cauce se mantenga una concentración constante. La inyección de trazador debe mantenerse por un tiempo suficiente como para poder asegurar que se alcanzará esta concentración de estabilización. En la Figura 3.7 el tiempo mínimo de inyección estaría dado por el tiempo que demora la curva c en alcanzar la estabilización.

**Figura 3.7:**  
**Variación de la mezcla con inyección constante de trazador**  
**(Measurement and computation of streamflow: volume I, 1982).**



El caudal del cauce se obtiene a partir de un balance de masa entre el punto de inyección y el punto de medición (ver Figura 3.8), asumiendo siempre que no hay pérdida de trazador a lo largo del canal.

**Figura 3.8:**  
**Volumen de control para el balance de masa.**





La ecuación que muestra este balance se puede ver a continuación:

$$Q \cdot C_b + q \cdot C = (Q + q) \cdot c \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow Q = \left( \frac{C - c}{c - C_b} \right) \cdot q$$

donde:

Q: caudal del cauce.

$C_b$ : concentración inicial del trazador en el agua del cauce.

q: caudal de inyección de trazador, se asume pequeño en comparación con Q.

C: concentración de trazador inyectada.

c: concentración de estabilización de trazador en el cauce.

En la mayoría de los casos se tiene que  $C_b$  es despreciable y que c es despreciable en comparación con C. De esta forma se puede escribir la expresión anterior de la siguiente forma:

$$Q \approx q \cdot \frac{C}{c} \quad (3.10)$$

La principal ventaja que presenta esta metodología es que, a diferencia del método de inyección instantánea, no es necesario tomar muestras durante todo el paso de la nube de trazador, ya que solo se necesita tener bien definida la concentración de estabilización. Esto minimiza los errores asociados al manejo de grandes cantidades de datos.

### 3.3.3 Método del tiempo de viaje.

El método del tiempo de viaje consiste en inyectar una cantidad de trazador en un flujo y medir el tiempo que demora la nube de trazador en viajar entre dos puntos de medición. Nuevamente es importante que se cumpla una condición de mezcla completa para asegurar la exactitud de los resultados.

Entre las principales razones por la cual los estudios de tiempo de viaje en un cauce son tan importantes encontramos:

- Aplicación a modelos de calidad.
- Apoyo para la toma de decisiones en caso de accidente, por ejemplo: derrame de sustancias peligrosas.
- Cálculo de caudales, lo cual implica tener un conocimiento de la forma de la sección transversal del cauce.

Al utilizar este método el caudal puede ser calculado de la siguiente forma:

$$Q = A \cdot v = A \cdot \frac{l}{t} \quad (3.11)$$

donde:

A: área de escurrimiento.

l: distancia entre los puntos de medición utilizados para el cálculo del tiempo de viaje.

t: tiempo que demora la nube de trazador en viajar entre los puntos de medición.

Es posible construir una relación del tipo exponencial entre el tiempo de viaje y el caudal pasante. En caso de construir una relación de este tipo es necesario tener, para un punto específico de control en un cauce, distintos pares de medidas de tiempo de viaje y caudal pasante. La relación se puede escribir de la siguiente forma:

$$t = \alpha \cdot Q^{-\beta} \quad (3.12)$$

donde:

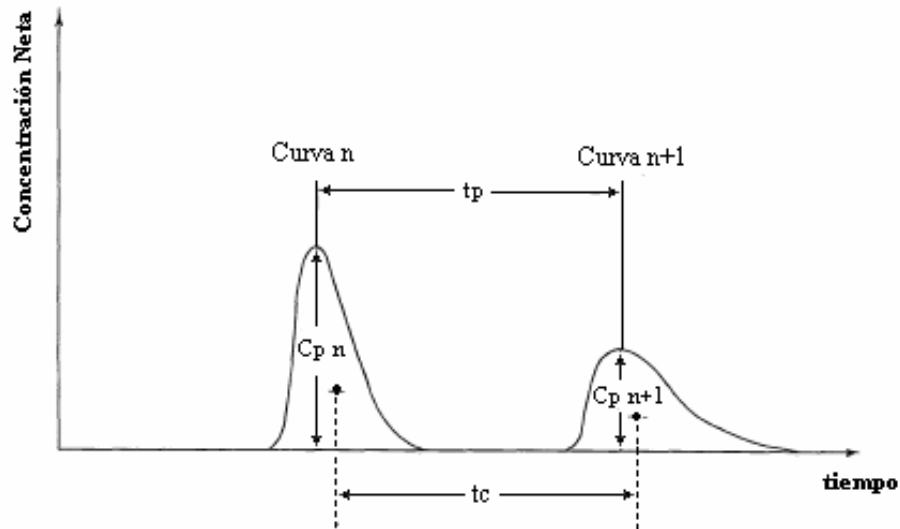
t: tiempo de viaje.

Q: caudal pasante por el punto de medición.

$\alpha$  y  $\beta$ : coeficiente a determinar.

Para medir la diferencia de tiempo es necesario tener claro el momento en el cual cierto punto característico de la curva pasa por el punto de medición. El punto que debe ser utilizado para este fin es el centro de gravedad de la curva (ver Figura 3.9) de manera que el tiempo de viaje de la nube entre dos puntos de medición estará dado por  $t_c$ . También puede ser utilizado como aproximación el tiempo que demora el peak de la nube en avanzar entre dos puntos de medición, ya que es más fácil de identificar y utilizar. Sin embargo hay que tener claro que esta es solo una aproximación y no entrega valores confiables.

**Figura 3.9:**  
**Punto a considerar en la medición del tiempo de viaje.**



La principal desventaja de esta metodología es la necesidad de conocer el área de escurrimiento del flujo. Con los métodos de inyección instantánea y continua nos podemos independizar de esta variable, lo cual elimina una posible fuente de error, sin embargo en este método es necesario conocer la sección de escurrimiento y, a menos que sea medida de manera exacta, existirá un error en la estimación del caudal del cauce.

### **3.4. Consideraciones sobre los Métodos de Aforo con Trazadores.**

La exactitud del cálculo del caudal estará relacionada con minimizar la pérdida de trazador a lo largo del cauce, con el efecto de la turbiedad del agua sobre ciertos trazadores, con el grado de mezcla completa que existe al momento de la medición, con la capacidad del sensor de detectar y medir la concentración de trazador, entre otros.

#### **3.4.1 Pérdida de trazador.**

Como los métodos están basados en la conservación de masa, la pérdida de trazador se traduce directamente en una menor exactitud de los resultados. Este efecto adverso puede producirse debido a la absorción o a reacciones químicas entre el trazador y uno o más de los siguientes componentes: fondo del lecho, material suspendido, material disuelto, plantas y/o otros organismos. En la mayoría de los casos el problema más importante está dado por la adsorción de trazador. El decaimiento fotoquímico también puede ser un factor a considerar y varía según el trazador y el tiempo de exposición a la luz solar, sin embargo no son comunes los casos de pérdidas por este tipo de fenómeno, incluso para casos de tintas fluorescentes.

Los problemas producidos por la pérdida de trazador pueden derivar en un sobredimensionamiento del caudal en el cauce, lo que puede ser corregido con la utilización del trazador correcto en cada caso.

### 3.4.2 Turbiedad del agua.

La turbiedad del agua puede aumentar o disminuir las mediciones de concentración de ciertos trazadores, por ejemplo tintas o sustancias fluorescentes. Es aconsejable, en caso de que las mediciones se hagan por medio de la toma de muestras, dejar que las partículas sedimenten por gravedad. Una mejor opción es centrifugar las muestras de manera de separar los sólidos, sin embargo esto puede resultar poco práctico.

### 3.4.3 Mezcla completa.

Como fue explicado anteriormente la mezcla completa es una condición necesaria para asegurar la exactitud del método, ya que ambos cálculos se basan en el principio de la conservación de masa. Al inyectar un trazador en un cauce la mezcla vertical ocurre, en la mayoría de los casos, mucho más rápido que la horizontal, de tal forma que esta última es la más restrictiva a la hora de fijar el punto de medición. En el caso de la inyección instantánea, se debe cumplir que las áreas bajo las curvas de respuesta del trazador a lo ancho del cauce sean iguales, mientras que en el caso de la inyección constante se debe lograr que las concentraciones de estabilización a lo ancho del cauce sean las mismas. Como alcanzar la mezcla completa puede llevar mucho tiempo o un largo del cauce demasiado extenso, se puede considerar como un buen punto de medición aquel en el cual se cumple que la mezcla ha alcanzado un cierto porcentaje. A esto se le llama mezcla óptima.

Comúnmente se considera como suficiente un porcentaje de mezcla del 95%, el cual puede ser calculado de las dos formas siguientes:

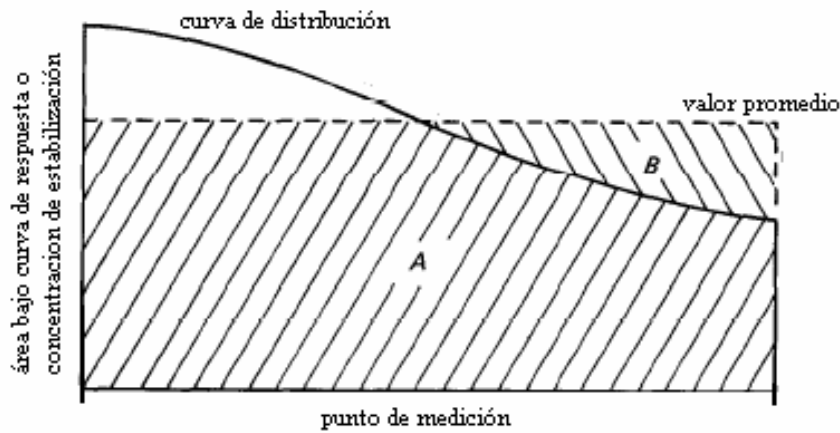
- **Primera forma de cálculo:** Se utiliza un método gráfico para el cálculo del porcentaje de mezcla. El primer paso es graficar el área bajo la curva de respuesta del trazador, en el caso de la inyección instantánea, o la concentración de estabilización del trazador, en el caso de la inyección constante, versus el punto de medición a lo ancho del cauce. A esta curva se le llamará: curva de distribución. Luego se grafica en este mismo gráfico el valor promedio de las áreas bajo las curvas de respuesta o de las concentraciones de estabilización, dependiendo del método de inyección utilizado.

Se define el área A como el área que se encuentra bajo la curva de distribución y bajo la recta del valor promedio (ver Figura 3.10). Además se define el área B como el área que se encuentra sobre la curva de distribución y bajo la recta del valor promedio (ver Figura 3.10).

Finalmente, utilizando la siguiente formula se calcula un valor del porcentaje de mezcla aproximado:

$$P_m = \left( \frac{A}{A + B} \right) \cdot 100 \quad (3.13)$$

**Figura 3.10:**  
**Área promedio de la curva de respuesta v/s punto de medición en la sección.**



Se puede ver que mientras más chica sea el área B, mejor será el grado de mezcla existente ya que los valores de las áreas bajo las curvas de respuesta o las concentraciones de estabilización serán más cercanos al valor medio.

- **Segunda forma de cálculo:** Para el cálculo del porcentaje de mezcla se puede utilizar alternativamente la siguiente expresión:

$$P_m = 100 - \left( |X_A - X_m| \cdot Q_A + |X_B - X_m| \cdot Q_B + |X_C - X_m| \cdot Q_C + \dots \right) \cdot \frac{50}{X_m \cdot Q} \quad (3.14)$$

donde:

$X_A, X_B, X_C, \dots$  áreas bajo las curvas de respuesta del trazador o concentración de estabilización medidas en los puntos A, B, C, ... de la transversal del cauce.

$X_m$ : área bajo la curva de respuesta o concentración de estabilización promedio calculado con los datos medidos en la transversal del cauce.

$Q_A, Q_B, Q_C, \dots$  son los caudales de cada una de las subsecciones A, B, C, ...

$Q$ : caudal total del cauce.

Si la distribución de los caudales en las subsecciones transversales es desconocida se pueden reemplazar estos términos por el área transversal de cada subsección. En el caso de que estos datos tampoco sean conocido se puede utilizar el ancho superficial de cada una de las subsecciones para calcular el porcentaje de mezcla.

#### 3.4.4 Definición del punto de medición.

Lo primero que hay que tener en cuenta son las condiciones que debe tener el lugar de medición. El cauce entre el punto de inyección y el de medición no debe tener zonas laterales demasiado bajas, ya que se dificulta la mezcla, y no debe presentar zonas muertas, de forma de no tener tiempos de viaje de la nube de trazador muy grandes y que no se produzcan pérdidas de éste. Además no deben existir ingresos o egresos de otros flujos al tramo del cauce medido.

Como la condición básica para la aplicación de las metodologías con trazador es la mezcla completa, es muy importante verificar el grado de mezcla en el cauce, ya que el nivel de exactitud en los aforos depende mayormente de esta mezcla.

La distancia óptima para alcanzar la mezcla completa puede ser estimada con varias formulas derivadas de distintos estudios. Estas ecuaciones deben ser usadas sólo como una aproximación y no como un valor definitivo. Cauces con tramos rectos y profundos presentan una mezcla más rápida. Un problema común es la creencia de que zonas de resalto o de aguas blancas presentan una mejor mezcla, sin embargo, a menos que haya una profundidad adecuada, la mezcla solo se producirá en la vertical. Algunas de las expresiones para estimar el largo necesario para la mezcla completa se presentan a continuación:

##### 3.4.4.1 Yotsukura y Cobb (1972).

La formula planteada por Yotsukura y Cobb para el cálculo del largo necesario para la mezcla completa se presenta a continuación:

$$L_0 = K \cdot \frac{v \cdot b^2}{E_z} \quad (3.15)$$

donde:

$L_0$ : distancia óptima para la mezcla completa [m].

K: coeficiente.

v: velocidad promedio del flujo [m/s].

b: ancho promedio del cauce [m].

En la formula anterior se define  $E_z$  como el coeficiente de mezcla lateral, el cual puede ser expresado como:

$$E_z = 0,2 \cdot d \cdot u^* \quad (3.16)$$

Además se define  $u^*$  como la velocidad de corte, la cual puede ser calculada de la siguiente forma:

$$u^* = \sqrt{g \cdot d \cdot s} \quad (3.17)$$

donde:

- d: altura promedio de agua en [m].
- g: gravedad en [m/s<sup>2</sup>].
- d: altura promedio de agua en [m].
- s: pendiente del cauce [m/m]

El valor del coeficiente K depende del grado de mezcla esperado, de la ubicación del punto de inyección en la sección transversal y del número de puntos de inyección. El efecto de inyectar el trazador en n puntos a lo ancho del cauce, donde cada inyección esta ubicada en el centro de subsecciones de flujo equivalente, es equivalente a inyectar el trazador en un cauce de ancho  $\frac{B}{n}$ . En la Formula 3.15 es posible ver que el término del ancho b está al cuadrado, por lo cual el largo estimado necesario para la mezcla se reduce en un factor de  $\left(\frac{1}{n}\right)^2$ , dependiendo del numero de inyecciones hechas a lo ancho del cauce. Si la inyección se hace en uno de los lados del cauce se tiene que el ancho equivalente es  $2 \cdot B$ , por lo que el largo necesario para la mezcla se incrementa en un factor de  $2^2$ .

En la Tabla 3.3 se muestra el valor del coeficiente K para distintas situaciones:

**Tabla 3.3:**  
**Valor del coeficiente K en la ecuación de Yotsukura y Cobb.**

|                           |                       | Coeficiente K        |       |       |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|-------|-------|
|                           |                       | Porcentaje de mezcla |       |       |
| Ubicación de la inyección | Número de inyecciones | 90                   | 95    | 98    |
| Centro                    | 1                     | 0.070                | 0.100 | 0.140 |
|                           | 2 <sub>a</sub>        | 0.018                | 0.025 | 0.035 |
|                           | 3 <sub>b</sub>        | 0.008                | 0.011 | 0.016 |
| Lateral                   | 1                     | 0.280                | 0.400 | 0.560 |

- a: para inyecciones en el centro de cada mitad de flujo.
- b: para inyecciones en el centro de cada tercio del flujo.

Si se quiere reducir el largo necesario para la mezcla se pueden usar dos o tres puntos de inyección a lo ancho del cauce. Utilizar una línea de inyección no es recomendable ya que el ingreso del trazador debería ser proporcional al caudal pasante en cada subsección, de lo contrario el largo necesario para la mezcla podría incrementarse.

#### 3.4.4.2 Otras formulas e cálculo .

Existen otras formulas para obtener un valor aproximado para el cálculo del largo necesario para la mezcla completa en un canal. Algunas de estas formulas se presentan a continuación (Measurement and computation of streamflow: volume I, 1982):

$$\blacksquare L = 2 \cdot v \cdot \frac{b^2}{d} \quad (3.18)$$

$$\blacksquare L = 0.6 \cdot \frac{R^{1/6}}{n \cdot g^{1/2}} \cdot \frac{b^2}{d} \quad (3.19)$$

donde:

R: radio hidráulico.

n: coeficiente de rugosidad de Manning.

- En Europa la expresión comúnmente utilizada es la siguiente (en unidades métricas):

$$L = 0.13 \cdot C \cdot \frac{(0.7 \cdot C + 6)}{g} \cdot \frac{w^2}{d} \quad (3.20)$$

donde:

w: ancho promedio de la sección.

C: coeficiente de Chezy ( $15 < C < 50$ ).

### 3.5. Resumen.

Entre los métodos de aforo con trazadores pueden distinguirse el de inyección instantánea y el de inyección continua. Ambas metodologías presentan ventajas importantes frente a sistemas de aforo convencionales, entre lo que se destaca:

- No es necesario medir el área de la sección de canal, ya que los aforos con trazadores se basan en la conservación del trazador en el cauce y en balances de masa entre lo inyectado y lo medido en una sección de control. Esto permite determinar el caudal analizando la forma en que el trazador viaja en el flujo.



- La literatura destaca que si el aforo con trazador es hecho tomando en cuenta las distintas consideraciones descritas en el punto 3.3, tales como: evitar pérdida de trazador, mezcla completa en la sección de control, una medición precisa de la curva de respuesta del trazador o de la concentración de estabilización, entre otras, es posible obtener niveles de exactitud importante para los valores de caudales aforados, pudiendo entregar valores más exactos que los sistemas de aforo convencionales.
- Como estas metodologías se basan en la mezcla completa del trazador en el cauce, no sería necesario medir la curva de respuesta en varias subsecciones de la zona de control, lo que permite reducir los puntos de medición y los consiguientes factores de error asociados a las mediciones.
- Los equipos utilizados para estos sistemas de aforo no presentan importantes partes mecánicas, como los molinetes u otro. Esto implica que existirían menos posibilidades de falla en los equipos debido a la interacción con elementos presente en el agua.

Para la aplicación de los métodos de aforo con trazadores es necesario cumplir con ciertas condiciones básicas de aplicación. Entre ellas se destacan las siguientes:

- La elección del trazador más adecuado dadas las características del agua es muy importante ya que influye directamente en la exactitud de los resultados. Debido a esto es necesario analizar el nivel de dificultad con que el trazador es detectado y medido, así como la posible interacción de éste con elementos presentes en el agua, tales como: sedimentos, flora, entre otros. También es importante tener en cuenta que las características del agua y del cauce pueden derivar en problemas logístico, ya que se puede necesitar trabajar con grandes cantidades de trazador, con los consiguientes problemas de transporte y manejo.
- La cantidad de trazador inyectado en el cauce es un aspecto importante, ya que debe ser definida de manera que la mezcla completa se alcance en un tiempo no muy extenso y que permita una fácil detección en el punto de medición.
- Como estos métodos se basan en la mezcla completa del trazador, es necesario elegir un tramo del canal que no presente afluentes o efluentes. Además la distancia entre el punto de inyección y el de medición debe ser suficiente como para que se alcance la mezcla completa.
- La medición de la curva de respuesta del trazador, en el caso de la inyección instantánea, o de la concentración de estabilización, en el caso de la inyección constante, debe hacerse con un nivel de exactitud importante, ya que el área bajo la curva de respuesta del trazador, en el caso de la inyección instantánea, y el valor de la concentración de estabilización, en la inyección constante, definen la exactitud del resultado final del aforo.

---

**CAPÍTULO 4**  
**RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LABORATORIO**

---

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LABORATORIO

### 4.1. Introducción

A continuación se presenta una discusión sobre las experiencias realizadas en laboratorio. Estas experiencias tenían por objetivo familiarizarse con los métodos de aforo químico, analizando las distintas variables involucradas en esta metodología de aforo, de forma que la posterior aplicación en terreno pueda ser hecha de forma satisfactoria.

En este capítulo se discutirán las experiencias más importantes, sin embargo el detalle de las experiencias se puede ver en el Anexo A. El método utilizado para hacer los aforos químicos fue el de inyección instantánea, el cual se encuentra descrito en el Capítulo 3, mientras que el trazador utilizado fue el Cloruro de Sodio. Este método fue elegido para las experiencias ya que sería más exacto que el método del tiempo de viaje y requiere manejar una menor cantidad de trazador que el método de inyección constante. El Cloruro de Sodio se eligió como trazador debido a lo económico y a su fácil manipulación.

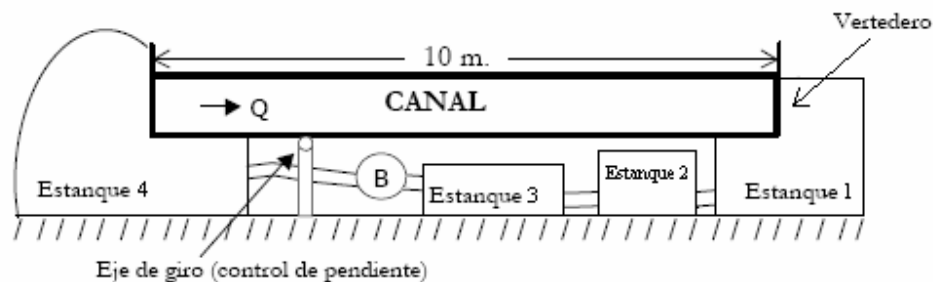
### 4.2. Instalación Experimental.

A continuación se describen de forma simplificada los instrumentos utilizados en las experiencias en laboratorio. Se pueden obtener más detalles en el Anexo A.

#### 4.2.1 Canal del laboratorio de fluidodinámica.

El canal disponible en el laboratorio de Fluidodinámica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile está hecho de paredes de vidrio, con una sección rectangular de 30 [cm] de ancho, aproximadamente 40 [cm] de alto máximo y 10 [m] de largo. Este canal funciona por recirculación del agua almacenada en 4 estanques, los cuales poseen en total un volumen máximo que alcanza los 2450 [l] aproximadamente y el rango de caudales con los que se puede trabajar puede alcanzar un valor máximo aproximado de 8 [l/s]

**Figura 4.1:**  
**Esquema del canal.**



El canal cuenta con una serie de accesorios que permiten imponer ciertas condiciones al escurrimiento. Entre los accesorios se tienen: un vertedero de pared delgada, una grada o vertedero de pared gruesa, dos vertederos triangulares, una compuerta, limnómetros, etc.

Las mediciones del caudal se realizan con la diferencia de presiones medidas en una placa orificio, la cual funciona como un tubo de Pitot, y utilizando la siguiente expresión:

$$Q = 4,26 \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (4.1)$$

donde:

Q: caudal en [l/s]

$\Delta p$ : diferencia de presión en [milibares]

#### **4.2.2 Conductímetro Schott LF5100.**

Este conductímetro funciona a través del módulo para computador CASSY Lab y permite medir valores de conductividad entre 0 [mS/cm] y 200 [mS/cm], funcionando con temperaturas entre  $-5$  [°C] y 80 [°C].

El módulo para computador CASSY Lab permite controlar distintos tipos de sensores según sea necesario, pudiendo obtenerse mediciones en línea de distintos parámetros. Entre las ventajas que presenta se destacan las siguientes: permite medir valores con distintas frecuencias, permite calibrar las mediciones, graficar los datos obtenidos, cambiar los rangos de medición de forma que los datos obtenidos tengan una precisión adecuada, entre otras.

#### **4.2.3 Conductímetro portátil Multi 340i.**

El conductímetro portátil que fue utilizado para las experiencias viene incluido en el set de sensores del instrumento portátil de medición Multi 340i, el cual tiene la capacidad de medir conductividad, salinidad, temperatura, entre otros. La célula conductímetro que utiliza este instrumento es la TetraCon 325.

#### **4.2.4 Conductímetro PASCO CI-6739A.**

El modelo de conductímetros PASCO funciona con la interfaz para computador PASCO *Science Workshop*, la cual permite mantener mediciones en línea durante un periodo de tiempo. Estos conductímetros pueden tener dos tipos de electrodos, uno de 1X y uno con una señal amplificada de 10X, donde cada uno de ellos puede trabajar en ambientes cuyas temperaturas estén en el rango de 0 [°C] y 80 [°C].

### 4.3. Metodología.

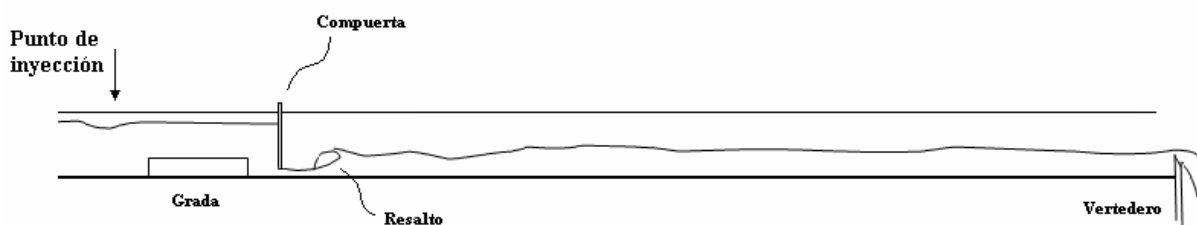
Las experiencias realizadas en las instalaciones de laboratorio fueron principalmente dos, estas son: medición de caudales y análisis de la mezcla del trazador en el agua. A continuación se describen cada una de ellas.

#### 4.3.1 Medición del caudal.

Para la medición del caudal se inyectó una cantidad de trazador conocida en el extremo aguas arriba del canal y se midió, a través de un conductivímetro, la curva de respuesta del trazador en el agua en distintos puntos.

La configuración del canal es básicamente la misma para todas las experiencias, la cual puede ser vista en la Figura 4.2. Como se puede ver, el canal es dividido en dos zonas principales, la primera ubicada aguas arriba de la compuerta, mientras que la segunda se encuentra aguas abajo del resalto. La primera zona se utilizó para la inyección del trazador, ya que el flujo, al estar forzado a pasar por la parte baja de la compuerta y por el resalto, favorece la mezcla del trazador en el agua. La segunda zona se utilizó para establecer los puntos de medición, los cuales fueron ubicados entre el final del canal y un punto un metro aguas abajo del resalto.

**Figura 4.2:**  
**Condiciones de experimentación básicas del canal.**



Luego de definir las secciones de control, se procedió con la inyección del trazador y con la medición del cambio de conductividad eléctrica en el agua utilizando el conductivímetro Schott LF5100, el cual se describe en la Sección 4.2.2. Así se midió la curva de respuesta y, utilizando la Ecuación 3.8, se pudo obtener un valor para el caudal. Las experiencias se realizaron midiendo la curva de respuesta en dos puntos principalmente, uno cercano al resalto y otro lo más alejado posible de éste, de forma de poder analizar las posibles diferencias producidas al medir en distintas secciones de control.

Al analizar los resultados obtenidos con estas experiencias se pudo ver que existe una diferencia importante entre lo aforado con el método de trazadores y lo obtenido con la placa orificio del canal. Debido a esto se procedió a analizar el nivel de mezcla del trazador en el agua.

### 4.3.2 Análisis de la mezcla del trazador.

La mezcla del trazador en el agua, se estudió a través de tres tipos de experiencias distintas, estas son: análisis de la mezcla del trazador al cambiar la distancia ente el punto de inyección y el de medición, análisis de la mezcla midiendo en dos puntos en la sección de control y, por último, análisis de la mezcla al cambiar el punto de inyección.

La primera experiencia se realizó inyectando el trazador aguas arriba de la compuerta y midiendo la curva de respuesta en cuatro puntos ubicados a lo largo del canal, de forma de poder analizar el cambio de la mezcla de trazador y los valores de los caudales obtenidos.

La segunda experiencia tuvo como puntos de inyección el mismo de la experiencia anterior, sin embargo la medición se realizó sólo en dos secciones de control ubicadas una cercana al resalto y otra lo más alejado posible de ésta. Las curvas de respuesta del trazador se midieron en dos puntos de cada sección, es decir, uno en la zona central y otro en la zona lateral. El principal objetivo de esta experiencia fue analizar el cambio en el nivel de mezcla a lo largo del canal, ya que ésta mejora a medida que las áreas bajo las curvas de respuesta medidas a lo ancho de una sección tienden a ser similares.

Por último se analizó el efecto de cambiar el punto de inyección del trazador, fijando uno aguas arriba de la compuerta y otro entre la compuerta y el resalto. Para el análisis de esta configuración se fijaron tres secciones de control ubicadas a lo largo del canal y aguas debajo del resalto.

### 4.4. Curva de Calibración.

Antes de poder llevar a cabo cualquier experiencia es necesario conocer la relación que permite transformar los valores de conductividad en valores de concentración, para lo cual se utiliza la Ecuación 4.2:

$$\text{Concentración} = k \cdot \text{Conductividad} \quad (4.2)$$

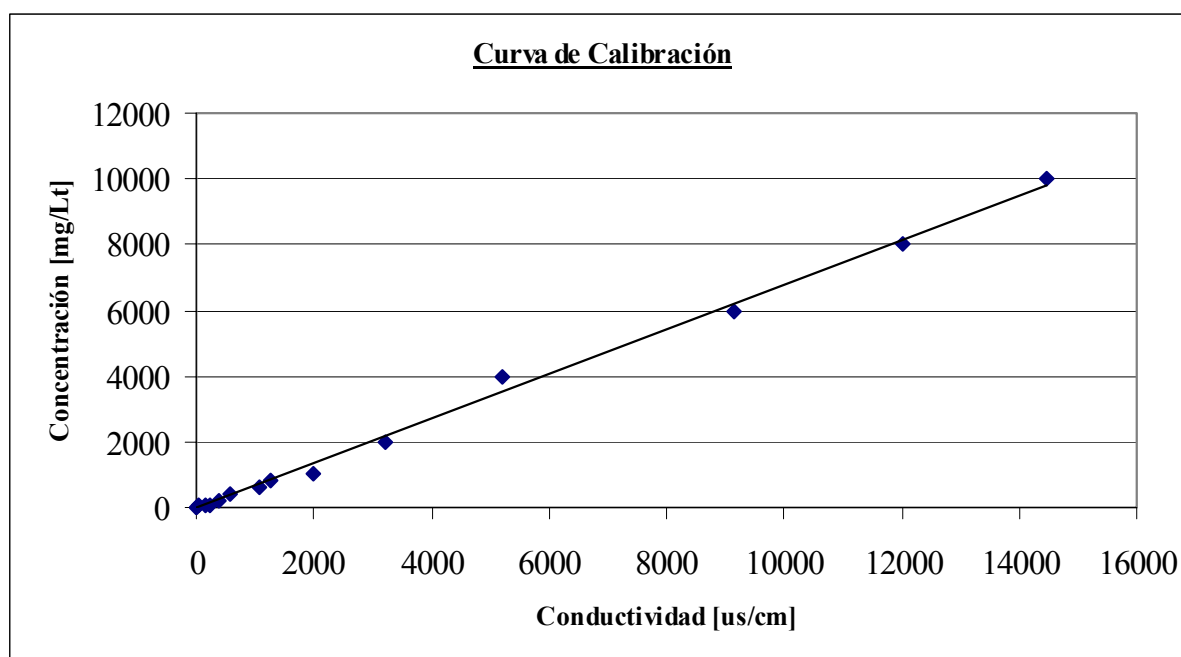
Para la determinación del coeficiente  $k$  se puede seguir un procedimiento como el descrito en la Sección 3.2.1. Es importante recordar que la conductividad varía según la temperatura del medio al momento de hacer la medición, de forma que para que todas las mediciones hechas sean comparables, es necesario hacer una corrección, llevando todos los valores a una temperatura estándar. Según esto, los valores de conductividad serán llevados a su equivalente a 20° C, de modo que el coeficiente de calibración obtenido estará asociado a esta temperatura.

La construcción de la curva se hizo fabricando una serie de soluciones con concentración conocida de trazador entre 0 [mg/l] y 10.000 [mg/l], y midiendo la conductividad de cada una de ellas con dos conductivímetros distintos, estos fueron: el Multi 340i y el PASCO CI-6739A. A

partir de ellos se pudieron obtener dos calibraciones diferentes, es decir, dos coeficientes de transformación distintos, de forma de poder analizar las posibles diferencias al medir con sensores distintos. Las conductividades medidas variaron entre 621 [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ] y 17.700 [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ] y la diferencia obtenida entre los valores de los dos conductivímetros fue pequeña. Esto produjo que los dos valores del coeficiente de transformación obtenidos variaran solo a partir del tercer decimal, lo que puede ser aceptado como un error propio del método de medición. Los coeficientes obtenidos fueron los siguientes:

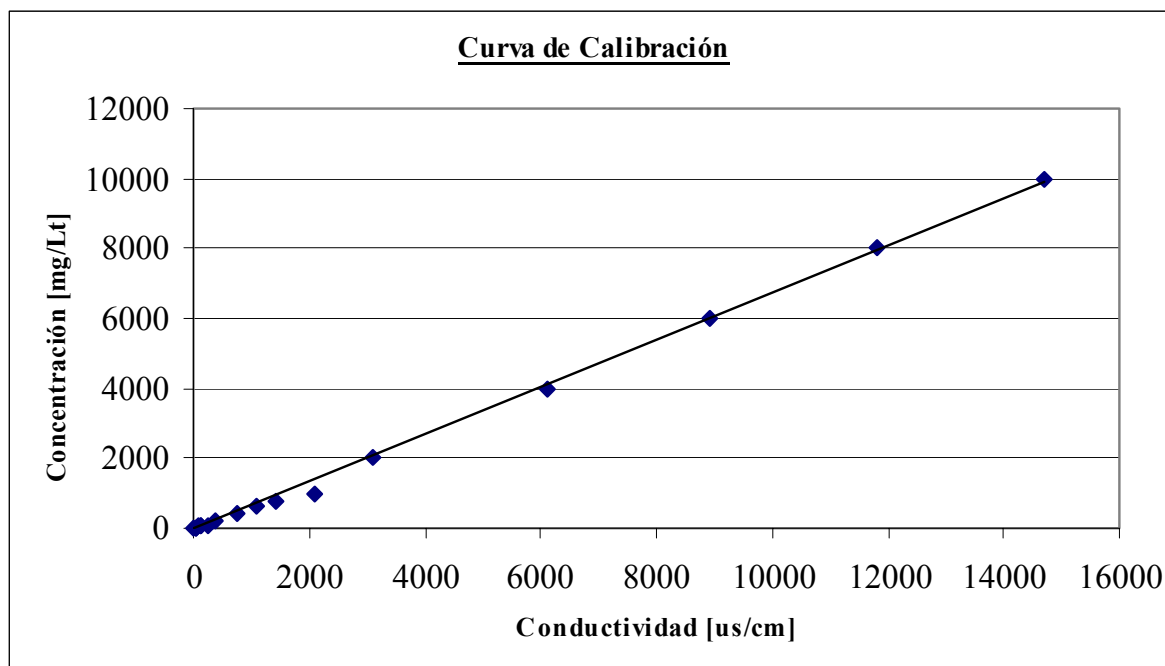
- Conductivímetro Pasco CI-6739A:  
 $Coef. = 0,679. \quad [(\text{mg}/\text{l})/(\mu\text{s}/\text{cm})]$   
 $R^2 = 0,9969$

**Figura 4.3:**  
**Curva de calibración con conductivímetro Pasco CI-6739A.**



- Instrumento de medición portátil Multi 340i:  
 $Coef. = 0,6724 \quad [(\text{mg}/\text{l})/(\mu\text{s}/\text{cm})]$   
 $R^2 = 0,9984$

**Figura 4.4:**  
**Curva de calibración con conductímetro del instrumento Multi 340i.**



Es posible en los resultados anteriores que el sensor utilizado no influye mayormente en el valor del coeficiente de transformación, ya que ambos valores son muy similares. Según esto, el criterio para elegir el coeficiente de transformación a utilizar fue el que está asociado a un mejor coeficiente de correlación, por lo que se eligió el obtenido con el instrumento de medición portátil Multi 340i, por lo que la expresión para pasar de conductividad a concentración sería:

$$\text{Conc.} = 0,6724 \cdot \text{Cond.} \tag{4.3}$$

donde:

Conc: concentración de Cloruro de Sodio en [ $\text{mg/l}$ ].

Cond: conductividad corregida de la solución en [ $\mu\text{s/cm}$ ].

#### 4.5. Aforo mediante Inyección Instantánea.

Con la curva de calibración hecha se procedió a medir el caudal por medio de un procedimiento de inyección instantánea de trazador en el canal.

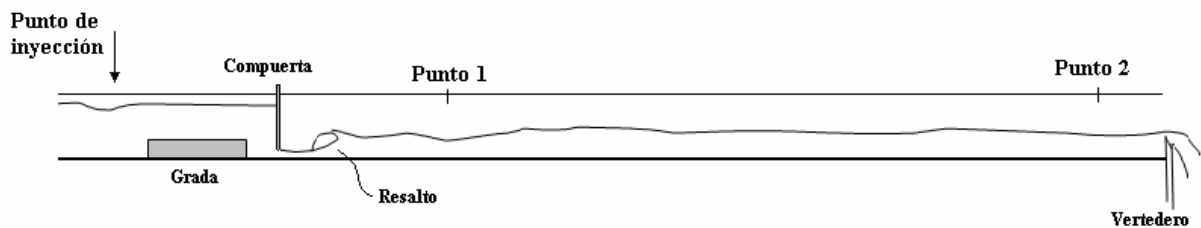
Para esta experiencia se definieron dos puntos de medición en el canal, el cual tiene 10 [m] de largo. El Punto 1 se ubicó a 3,1 [m] del comienzo del canal y el Punto 2 al final de éste, a 0,9 [m] del final, siendo la distancia entre ellos 6 [m]. En cada uno de estos puntos se midieron las curvas de respuesta en el centro del flujo, las cuales eran generadas por la inyección en serie a intervalos conocidos de soluciones de 1 [l] con una concentración de Cloruro de Sodio de 200



[gr/l]. El punto de inyección se ubico aproximadamente a 40 [cm] del comienzo del canal, a 1,4 [m] de la compuerta.

En la primera parte del canal se utilizó una compuerta para imponer un resalto, de tal forma de aumentar la mezcla del trazador en el agua. Esto generó una zona de aguas tranquilas aguas arriba de esta compuerta, lugar donde se fijó el punto de inyección. La configuración impuesta en el canal se puede ver en la Figura 4.5:

**Figura 4.5:**  
**Condiciones de experimentación del canal para la medición de caudales en laboratorio.**



Los detalles de las condiciones de experimentación del canal utilizadas para las experiencias se pueden ver en la Tabla 4.1:

**Tabla 4.1:**  
**Características del escurrimiento en el canal.**

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,28                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 1,8 del comienzo del canal |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 2,3 del comienzo del canal |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,095                      |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,04                       |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0                          |

El caudal utilizado para estas experiencias es 5 [l/s], el cual fue calculado utilizando la placa orificio del canal. Cada uno de los grupos de datos serán nombrados como sigue:

- Grupo 1: medición hecha en el Punto 1.
- Grupo 2: medición hecha en el Punto 2.

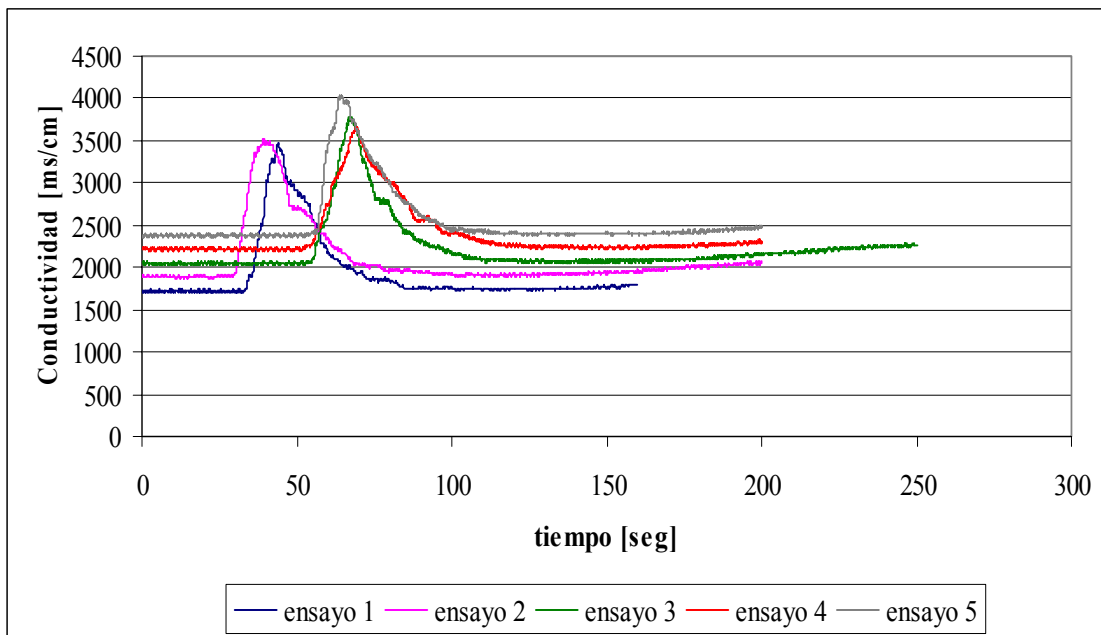
A continuación se pueden ver los resultados obtenidos para cada grupo de experiencias. Luego de la adquisición de los datos fue posible calcular el valor promedio de los resultados obtenidos, así como una diferencia porcentual obtenida como el porcentaje de la varianza de los datos con respecto al promedio.

Es importante destacar que la ubicación del comienzo de las curvas de respuesta no tiene relación con el valor de caudal, sino con el momento en el cual comienza la recaudación de datos. Como el punto de medición es fijo, el tiempo entre la inyección y la llegada de la nube a la sección de control debe ser similar en cada ensayo. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 4.2 y 4.3:

**Tabla 4.2:  
Resultados del grupo 1.**

| n° ensayo         | Área bajo la curva de respuesta<br>[mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-------------------|---|--------------|
| 1                 | 22568,4                                       | 8,86         |
| 2                 | 24178,2                                       | 8,27         |
| 3                 | 22221,6                                       | 9,00         |
| 4                 | 23030,6                                       | 8,68         |
| 5                 | 22232,8                                       | 9,00         |
| <b>Promedio</b>   | 22846,3                                       | 8,76         |
| <b>Diferencia</b> | 3,56%   | 3,46%        |

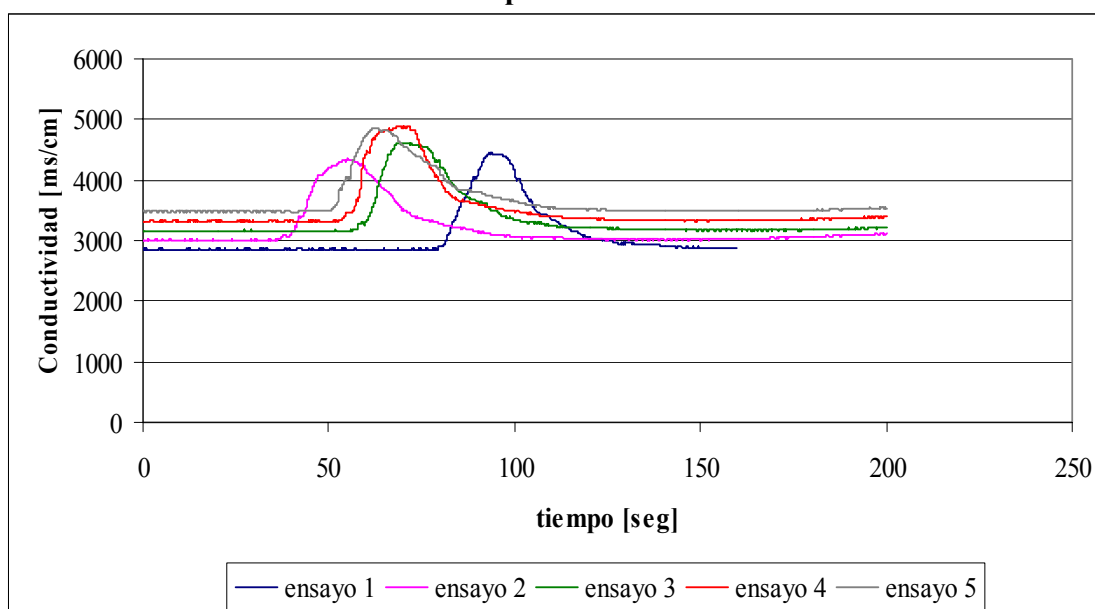
**Figura 4.6:  
Curvas de respuesta medidas en el Punto 1.**



**Tabla 4.3:  
Resultados del grupo 2.**

| n° ensayo         | Área bajo la curva de respuesta<br>[mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-------------------|---|--------------|
| 1                 | 25305,9                                       | 7,90         |
| 2                 | 25756,2                                       | 7,77         |
| 3                 | 25735,4                                       | 7,77         |
| 4                 | 26639,6                                       | 7,51         |
| 5                 | 26154,9                                       | 7,65         |
| <b>Promedio</b>   | 25918,4                                       | 7,72         |
| <b>Diferencia</b> | 1,94%   | 1,93%        |

**Figura 4.7:  
Curvas de respuesta medidas en el Punto 2.**



Es posible notar que en cada grupos de experiencias se obtuvieron valores de caudales similares entre cada ensayo pero distintos a los medidos con la placa orificio del canal. En la Tabla 4.4 es posible ver la magnitud de esta diferencia:

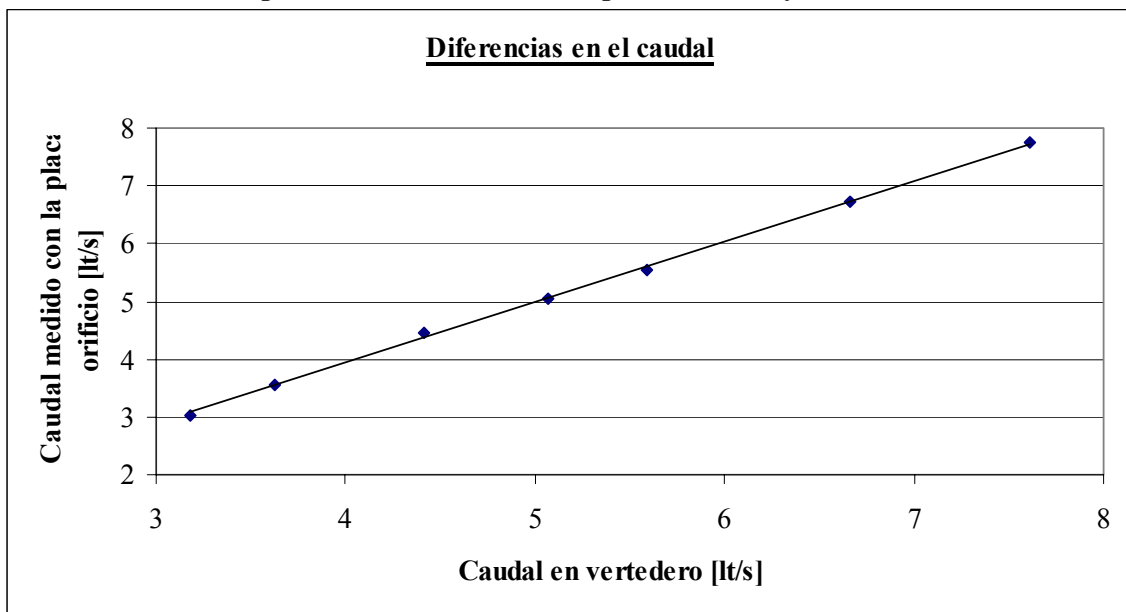
**Tabla 4.4:  
Resumen de resultados.**

| Experiencia     | Caudal promedio medido con el aforo químico [l/s] | Diferencia de la placa orificio con respecto al aforo químico |
|-----------------|---|---|
| 1-1             | 8,76  | 57,52%  |
| 1-2             | 7,72  | 65,30%  |
| <b>Promedio</b> | 8,24  | 61,41%  |

En la tabla anterior es posible ver que existe una diferencia importante entre los caudales medidos con el instrumento del canal y los medidos con el aforo químico, la cual alcanza el 61,41%. Sin embargo la variación del caudal entre los ensayos de cada grupo de experiencias hechas con el método de inyección instantánea es pequeña y varía entre 2% y 4% con respecto al promedio. Esta diferencia puede ser considerada como propia del método de aforo químico, ya que es imposible lograr que cada inyección y medición entregue valores exactamente iguales.

A pesar de la pequeña variación de los caudales obtenidos con el trazador, no resulta posible aceptar una diferencia promedio del 61,41% con los valores obtenidos con la placa orificio. En otras experiencias, las cuales se encuentran descritas en detalle en el Anexo A, fue posible analizar y comprobar que la calibración del sistema de medición del canal es correcta. Para esto se midió, para distintos caudales, el valor entregado por la placa orificio y por el vertedero ubicado en la parte final de del canal. Los resultados obtenidos pueden verse en el Figura 4.8:

**Figura 4.8:**  
**Comparación de caudales con placa orificio y vertedero.**



Los resultados obtenidos con los datos anteriores son los siguientes:

$$pendiente = 1,0521$$

$$R^2 = 0,9989$$

Dado lo anterior, es posible deducir que existe un problema con los resultados obtenidos, ya que no existen problemas con la placa orificio. Para poder tener una idea más clara del comportamiento del trazador en la instalación experimental se analizará la mezcla del trazador a lo largo del canal, ya que ésta es una condición básica para la aplicación del método de aforo químico.

## 4.6. Mezcla del Trazador.

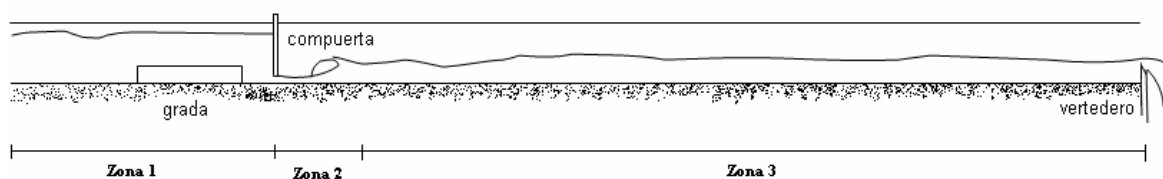
### 4.6.1 Aspectos generales.

Para el análisis de la mezcla del trazador en el agua se hicieron tres experiencias diferentes. En la primera se pretende analizar el cambio del caudal aforado al aumentar la distancia entre el punto de inyección y el de medición. En la segunda se compararon los caudales y las áreas bajo las curvas de respuesta del trazador medidas en dos puntos distintos de la sección de escurrimiento, de forma de analizar el grado de mezcla existente en el flujo. Por último se realizó una experiencia en la cual se intentó analizar el efecto de inyectar el trazador en dos puntos diferentes, cada uno con un régimen de escurrimiento diferente.

La configuración básica del canal para las experiencias fue siempre similar, identificándose tres zonas principales. Estas pueden verse en la Figura 4.9:

- Zona 1: parte del canal que se encuentra aguas arriba de la compuerta. Aquí se tiene una zona de aguas tranquilas, la cual tiene un escurrimiento de río.
- Zona 2: parte del canal que se encuentra entre la compuerta y el final del resalto. Aquí podemos identificar un sector de contracción del flujo, el cual tiene un escurrimiento de torrente. El resalto se impuso para mejorar la mezcla del trazador en el agua.
- Zona 3: parte del canal donde se realizan las mediciones de conductividad, es decir, donde se caracteriza el paso de la nube de trazador. Su extensión va desde el final del resalto hasta el final del canal.

**Figura 4.9:**  
**Condiciones de experimentación básicas del canal para análisis de mezcla.**



### 4.6.2 Cambio del punto de medición a lo largo del canal.

Estas experiencias tuvieron por objetivo ver qué sucede con los valores del caudal medido a través del método químico de aforo a medida que alejamos el punto de medición del punto de inyección. Para este experimento se utilizó la configuración básica del canal, la cual fue descrita anteriormente. Las principales características del canal en este experimento se describen a continuación:

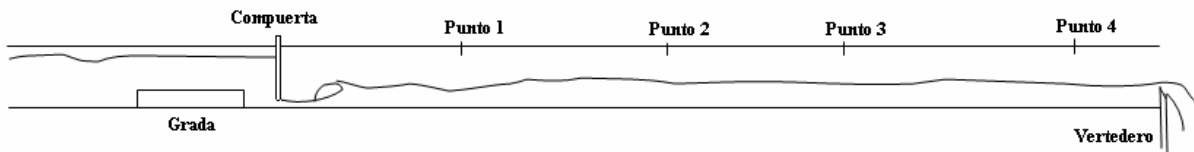
**Tabla 4.5:  
Características del escurrimiento en el canal.**

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,278                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 2,35 del comienzo del canal |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 3,1 del comienzo del canal  |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,092                       |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,048                       |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0,0152                      |

Para las mediciones se fijaron cuatro puntos en la zona 3, los cuales se ubican en las siguientes posiciones (ver Figura 4.10):

- Punto 1: ubicado a 4,1 [m] del comienzo del canal.
- Punto 2: ubicado a 6,1 [m] del comienzo del canal.
- Punto 3: ubicado a 7,6 [m] del comienzo del canal.
- Punto 4: ubicado a 9,2 [m] del comienzo del canal.

**Figura 4.10:  
Condiciones de experimentación del canal para la experiencia en laboratorio.**



Para las experiencias se utilizó un caudal pasante en el canal de 5,2 [l/s]. Las inyecciones de la solución trazadora se realizaron aguas arriba de la compuerta, en el centro del flujo. Para cada punto de medición se hicieron dos inyecciones, ambas de 1 [l], las cuales tenían concentraciones diferentes, una con una concentración de 150 [gr/l] y la otra con 200 [gr/l]. Según esto se realizaron en total ocho mediciones. Para identificar los grupos de mediciones se utilizará la siguiente convención:

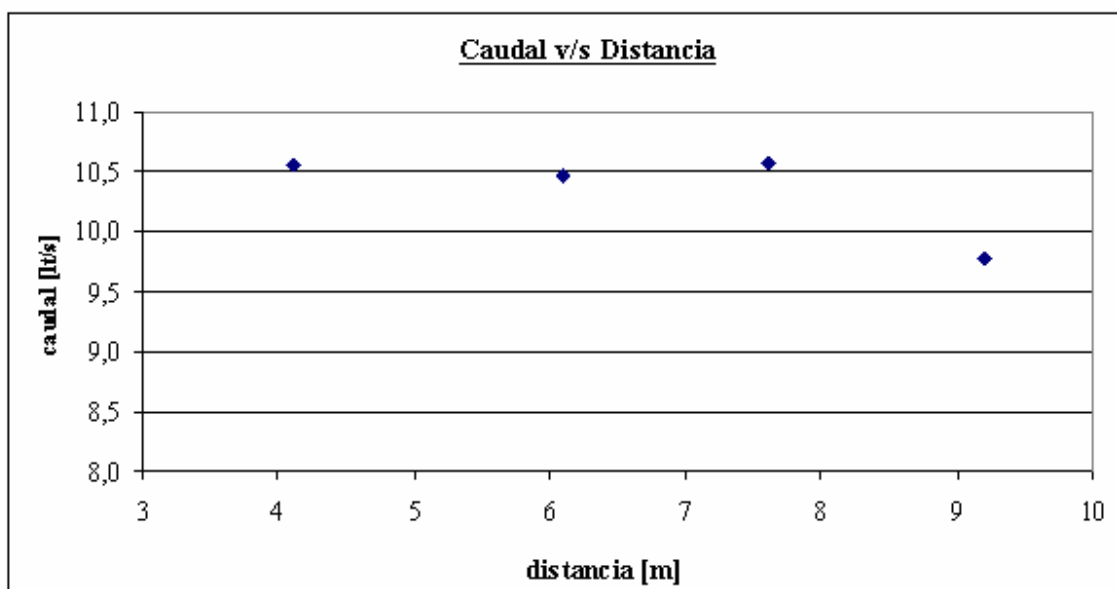
- Grupo 1: mediciones hechas inyectando la solución con una concentración de trazador de 150 [gr/l].
- Grupo 2: mediciones hechas con una concentración de trazador en la solución inyectada de 200 [gr/l].

Los resultados obtenidos para las experiencias realizadas en el canal se muestran en las Tablas 4.6 y 4.7:

**Tabla 4.6:  
Resultados Grupo 1.**

| Posición medición [m] | Area bajo curva de respuesta [mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-----------------------|---|--------------|
| 4,1                   | 14200,40                                | 10,563       |
| 6,1                   | 14329,02                                | 10,468       |
| 7,6                   | 14193,28                                | 10,568       |
| 9,2                   | 15352,15                                | 9,771        |
| <b>Promedio</b>       | 14518,71                                | 10,34        |
| <b>Error</b>          | 3,85%                                   | 3,71%        |

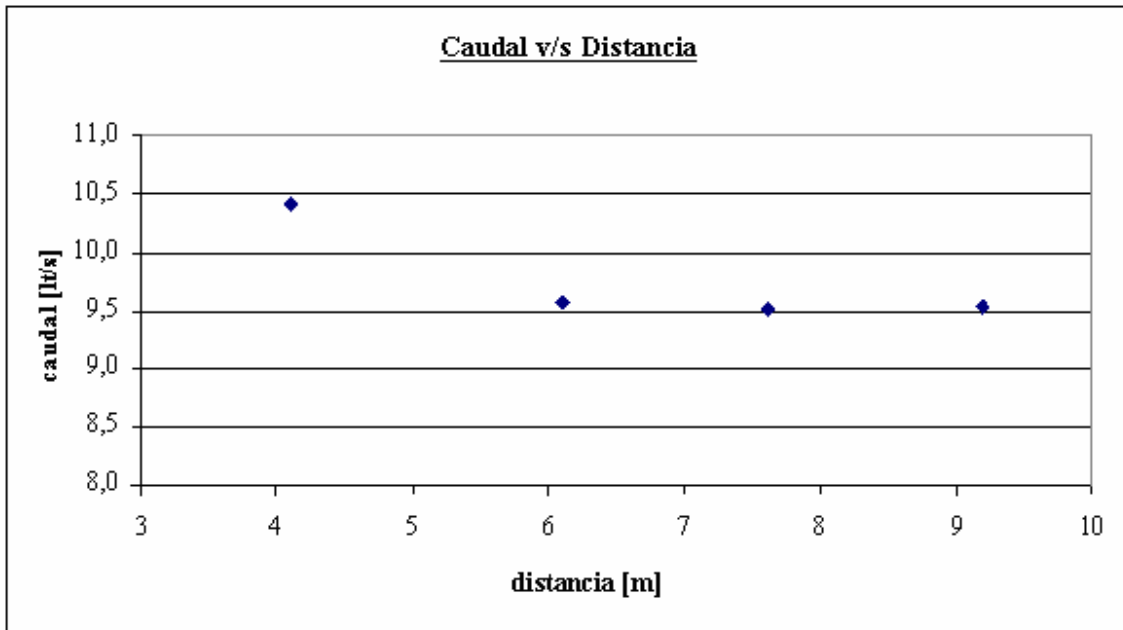
**Figura 4.11:  
Caudal v/s Distancia Grupo 1.**



**Tabla 4.7:  
Resultados Grupo 2.**

| Posición medición [m] | Area bajo curva de respuesta [mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-----------------------|---|--------------|
| 4,1                   | 19205,80                                | 10,41        |
| 6,1                   | 20880,15                                | 9,58         |
| 7,6                   | 21013,51                                | 9,52         |
| 9,2                   | 20976,86                                | 9,53         |
| <b>Promedio</b>       | 20519,08                                | 9,76         |
| <b>Desv. est.</b>     | 877,33                                  | 0,44         |
| <b>Error</b>          | 4,28%                                   | 4,46%        |

**Figura 4.12:**  
**Caudal v/s Distancia Grupo 2.**



El grado de mezcla del trazador en el canal puede ser interpretado a partir de la diferencia de las áreas bajo la curva de respuesta del trazador en los distintos puntos de medición a lo largo del canal y para una misma concentración de inyección. Según esto es posible ver que no existen grandes diferencias en los valores obtenidos, siendo estas diferencias del orden del error obtenido para el método de aforo químico en las experiencias descritas en la Sección 4.5, es decir, al hacer aforos químicos sucesivos en un mismo punto y con una misma concentración. Esto podría deberse a dos razones principalmente:

- La mezcla en el canal es buena o cercana a la óptima, por lo que las áreas bajo las curvas de respuesta y los caudales obtenidos serían correctos. Si esto es cierto se mantendría una diferencia con los caudales obtenidos con la placa orificio del canal.
- La mezcla aún no es óptima y no es posible observar una mejoría de ésta a lo largo del canal ya que el canal no tiene una longitud suficiente para que se produzcan cambios importantes.

Además los resultados obtenidos no ayudan a identificar el problema que existe al aplicar el método de aforo químico, ya que se siguen obteniendo caudales mayores a los calculados con la placa orificio, es decir, el caudal calculado con la placa orificio sigue siendo aproximadamente un 50% más pequeño.



**Tabla 4.8:  
Resumen de resultados.**

|                | Area promedio bajo curva de respuesta [mg · s/l] | Caudal promedio [l/s] | Diferencia de la placa orificio con respecto al aforo químico |
|----------------|--|-----------------------|---|
| <b>Grupo 1</b> | 14518,7  | 10,34                 | 50,50%  |
| <b>Grupo 2</b> | 20519,1  | 9,76                  | 53,53%  |

Debido a la falta de resultados concluyentes se hace necesaria la realización de más experiencias que permitan ver mejor el estado de la mezcla del trazador en el flujo.

#### **4.6.3 Medición de las curvas de respuesta en el centro y en la zona lateral del canal.**

El nivel de mezcla en el cauce puede ser analizado comparando las áreas bajo las curvas de respuesta en el centro y en las zonas laterales del flujo. A medida que la mezcla aumenta el valor de estas áreas comenzará a ser similar hasta igualarse en el momento en que la mezcla sea perfecta. Este análisis puede ser hecho sin importar la forma que tengan las curvas generadas por el paso de la nube de trazador, ya que el grado de mezcla esta determinado por el área y no por la forma de ésta.

Dado lo anterior, se realizaron dos experiencias en las cuales se caracterizaron las curvas de respuesta en el centro y en una de las zonas laterales del flujo, específicamente a 3 [cm] de uno de los bordes del canal. Cada una de estas experiencias se realizó con un caudal distinto, siendo el primero 5 [l/s] y segundo 5,2 [l/s]. El propósito de realizar esta experiencia dos veces fue poder verificar la metodología utilizada y los resultados obtenidos, de forma de evitar errores en la metodología. Para cada punto de medición y para cada caudal se realizaron inyecciones en serie de trazador a intervalos de tiempo conocidos, siendo todas inyecciones de 1 [l] de solución con una concentración de 200 [gr/l] de Cloruro de Sodio. Además el punto de inyección fue fijado en una zona aguas arriba de la compuerta, siempre en la parte central del flujo.

En el canal se utilizó la configuración básica antes descrita y se fijaron dos puntos de medición, los cuales se describen a continuación:

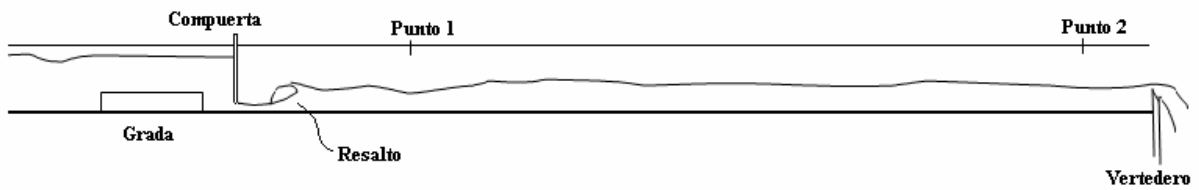
- Punto 1: ubicado justo después del resalto, aproximadamente a 3,1 [m] del comienzo del canal.
- Punto 2: ubicado en la parte final del canal, a 9,1 [m] del comienzo del canal.

Las características específicas de las Condiciones de experimentación del canal pueden verse en la Tabla 4.9 y Figura 4.13:

**Tabla 4.9:**  
**Características del escurrimiento en el canal.**

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,28                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 1,8 del comienzo del canal |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 2,3 del comienzo del canal |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,095                      |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,04                       |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0                          |

**Figura 4.13:**  
**Condiciones de experimentación del canal .**



Cada una de las experiencias realizadas serán nombradas como sigue:

- Experiencia 1-1: medición hecha con un caudal de 5 [l/s] en el punto 1.
- Experiencia 1-2: medición hecha con 5 [l/s] en el punto 2.
- Experiencia 2-1: medición hecha con 5,2 [l/s] en el punto 1.
- Experiencia 2-2: medición hecha con 5,2 [l/s] en el punto 2.

Según lo anterior se obtuvieron una serie de resultados, los cuales se presentan en las Tablas 4.10 a 4.13:

**Tabla 4.10:**  
**Resultados de la Experiencia 1-1.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|-------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                       | lateral | central      | lateral |
| 1               | 22568,4                       | 19547,9 | 8,86         | 10,23   |
| 2               | 24178,2                       | 20128,4 | 8,27         | 9,94    |
| 3               | 22221,6                       | 19972,9 | 9,00         | 10,01   |
| 4               | 23030,6                       | 20578,7 | 8,68         | 9,72    |
| 5               | 22232,8                       | 20527,3 | 9,00         | 9,74    |
| <b>Promedio</b> | 22846,3                       | 20151,0 | 8,76         | 9,93    |
| <b>Error</b>    | 3,56%                         | 2,11%   | 3,46%        | 2,12%   |

**Tabla 4.11:  
Resultados de la Experiencia 1-2.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|-------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                       | lateral | central      | lateral |
| 1               | 25305,9                       | 22312,7 | 7,90         | 8,96    |
| 2               | 25756,2                       | 22453,4 | 7,77         | 8,91    |
| 3               | 25735,4                       | 21765,5 | 7,77         | 9,19    |
| 4               | 26639,6                       | 22692,9 | 7,51         | 8,81    |
| 5               | 26154,9                       | 23723,1 | 7,65         | 8,43    |
| <b>Promedio</b> | 25918,4                       | 22589,5 | 7,72         | 8,86    |
| <b>Error</b>    | 1,94%                         | 3,18%   | 1,93%        | 3,13%   |

**Tabla 4.12:  
Resultados de la Experiencia 2-1.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|-------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                       | lateral | central      | lateral |
| 1               | 23840,4                       | 19134,6 | 8,39         | 10,45   |
| 2               | 23279,4                       | 18226,3 | 8,59         | 10,97   |
| 3               | 24152,6                       | 18310,2 | 8,28         | 10,92   |
| 4               | 23683,1                       | 18498,9 | 8,45         | 10,81   |
| 5               | 24600,5                       | 19263,3 | 8,13         | 10,38   |
| 6               | 25409,1                       | 19778,8 | 7,87         | 10,11   |
| <b>Promedio</b> | 24160,8                       | 18868,7 | 8,29         | 10,61   |
| <b>Error</b>    | 3,13%                         | 3,28%   | 3,08%        | 3,25%   |

**Tabla 4.13:  
Resultados de la Experiencia 2-2.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|-------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                       | lateral | central      | lateral |
| 1               | 23007,5                       | 16656,6 | 8,69         | 12,01   |
| 2               | 23410,8                       | 18338,7 | 8,54         | 10,91   |
| 3               | 24318,4                       | 18368,5 | 8,22         | 10,89   |
| 4               | 24199,0                       | 19149,1 | 8,27         | 10,44   |
| 5               | 22823,1                       | 18349,4 | 8,76         | 10,90   |
| 6               | 23902,9                       | 19586,0 | 8,37         | 10,21   |
| <b>Promedio</b> | 23610,3                       | 18408,1 | 8,48         | 10,89   |
| <b>Error</b>    | 2,65%                         | 5,44%   | 2,66%        | 5,67%   |

Al analizar los resultados obtenidos se puede ver que el área bajo la curva de respuesta en la zona lateral y en el centro del flujo no son iguales y presentan una distorsión mayor al error de aproximadamente 4% estimado para el método (ver Tabla 4.14). Esto permite observar que, aunque existe un grado de mezcla importante, no existe una mezcla completa del trazador, por lo

que es esperable que los caudales obtenidos con la placa orificio del canal tengan una diferencia con los obtenidos con el aforo químico.

**Tabla 4.14:**  
**Resumen de los promedios de las áreas bajo la curva de respuesta.**

| Experiencia | Área promedio bajo la curva de respuesta [mg · s/l] |         | Diferencia [%] |
|-------------|---|---------|----------------|
|             | central   | lateral |                |
| 1-1         | 22846,3   | 20151,0 | 12,54%         |
| 1-2         | 25918,4   | 22589,5 | 13,73%         |
| 2-1         | 24160,8   | 18868,7 | 24,60%         |
| 2-2         | 23610,3   | 18408,1 | 24,76%         |

También es posible notar en la Tabla 4. 14 que la diferencia entre las áreas en el centro y en la zona lateral del flujo se encuentra entre el 10% y 25% del promedio entre ambas, siendo mayor la del segundo caudal. Esto no tiene una explicación clara ya que los caudales utilizados son similares, por lo que no debería haber una diferencia importante en la mezcla entre los dos grupos de experiencias. Puede ser que la diferencia obtenida esté relacionada con un error propio del método, es decir, la mezcla no siempre se obtiene en el mismo grado para experiencias similares.

Supongamos que se inyectan en un medio turbulento una serie de nubes iguales, midiendo la mezcla de cada una de ellas en un periodo suficientemente largo. Si se elimina el efecto de la advección será posible ver que, en promedio, el centro de masa de las nubes tiende al origen, sin embargo las nubes de trazador presentarán diferencias punto a punto en la concentración, por lo que el centro de masas de cada nube será diferente de la ubicación promedio. Si se espera un tiempo suficientemente largo, las nubes de trazador crecerán hasta hacerse más grandes que las turbulencias y su centro de masa tenderá a estabilizarse en el origen (Fischer, 1979). Esto describe aproximadamente el efecto observado en las experiencias en laboratorio.

Otro análisis posible de realizar es ver que hubiera pasado si la mezcla completa se hubiera alcanzado en los puntos de medición. Si la inyección de la solución en el agua se ha hecho en el centro del flujo se obtendrá, al comienzo de la experiencia, una cantidad de trazador mayor en el centro y menor en las zonas laterales. A medida que la nube avanza, parte del trazador presente en el centro se desplazará hacia los lados hasta que en toda la sección de escurrimiento se tenga una cantidad similar. Si se entiende el proceso de mezcla de esta forma, entonces es posible ver que la cantidad de trazador que se obtendrá cuando la mezcla sea perfecta puede ser aproximada por el promedio entre lo que se tiene en el centro y lo que se tiene en la zona lateral, por lo que se puede obtener un valor tentativo de lo que debería obtenerse al existir una mezcla completa del trazador en el agua. Según lo anterior se obtienen los resultados de la Tabla 4.15:

**Tabla 4.15:  
Calculo del área de estabilización y su caudal.**

|                       | Área bajo la curva [mg · s/l] |         | Área estabilización [mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-----------------------|-------------------------------|---------|--------------------------------|--------------|
|                       | central                       | lateral |                                |              |
| <b>Promedio total</b> | 24134,0                       | 20004,3 | 22069,2                        | 9,06         |

Al hacer el promedio se obtiene un área bajo la curva de respuesta de 22069,2 [mg · s/l] la cual nos da una idea del valor que se debería alcanzar en la mezcla completa. Luego es posible calcular un valor del caudal según esta área, ya que la cantidad de trazador inyectada es conocida. El caudal se puede calcular de la siguiente forma:

$$Q = \frac{M}{\int (C - C_b) \cdot dt} = \frac{M}{Área} = \frac{200.000}{22069,2} = 9,06 \text{ [l/s]}$$

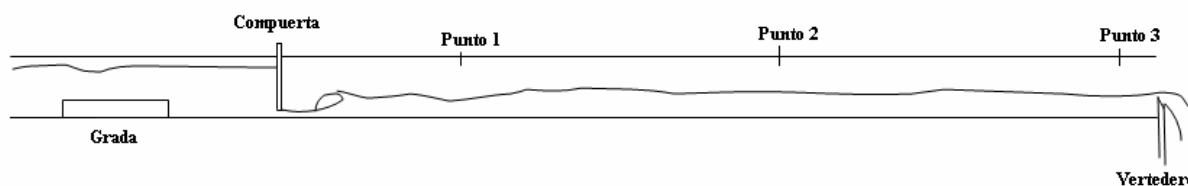
Es claro que este caudal, el cual se aproxima al que se debería obtener en la mezcla completa, no es en nada parecido al obtenido con la placa orificio del canal, siendo el obtenido con este método aproximadamente un 55% del obtenido con el aforo químico. Nuevamente se obtienen errores similares a los obtenidos en las experiencias anteriores, sin embargo, aunque la mezcla no es óptima, queda claro que este error no se debe a un problema de mezcla en el canal.

#### 4.6.4 Análisis del cambio del punto de inyección.

Esta experiencia se realizó para ver que efecto tiene el cambio del punto de inyección de trazador en el resultado de los aforos químicos. Para analizar esta situación se utilizó la configuración básica del canal, la cual fue descrita anteriormente, y se fijaron tres puntos de medición. Además la curva de respuesta del trazador fue medida en el centro del flujo y en la zona lateral de éste, a 3[cm] de uno de los bordes. Los puntos de medición fueron los siguientes:

- Punto 1: ubicado a 3,5 [m] del comienzo del canal.
- Punto 2: ubicado a 3 [m] del punto 1, es decir, a 6,5 [m] del inicio del canal.
- Punto 3: ubicado a 6 [m] del punto 1, es decir, a 9,5 [m] del comienzo del canal.

**Figura 4.14:  
Condiciones de experimentación del canal**



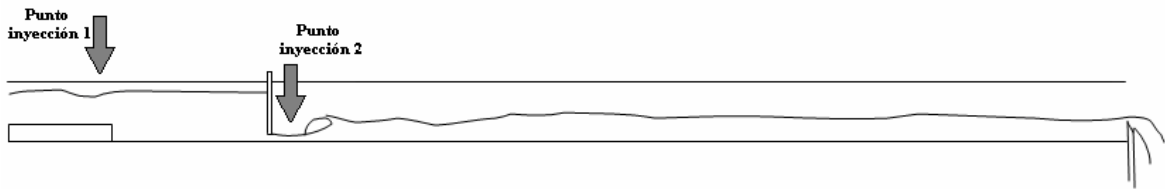
Las características específicas de la configuración del canal se describen en la Tabla 4.16:

**Tabla 4.16:**  
**Características del escurrimiento.**

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,285                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 1,57 del comienzo del canal |
| <b>abertura compuerta [cm]</b>            | 2,3                         |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 2,4 del comienzo del canal  |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,103                       |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,04                        |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0                           |

Las experiencias se dividieron en dos grupos, cada grupo con un punto de inyección diferente. El primer grupo de experimentos se realizó fijando el punto de inyección en una zona aguas arriba de la compuerta, a 0.7 [m] del comienzo del canal, es decir, en una zona de aguas tranquilas. El segundo grupo de experiencias se realizó inyectando la solución en un punto aguas abajo de la compuerta y antes del resalto, aproximadamente a 1.8 [m] del inicio del canal. Esta última es una zona de escurrimiento de torrente donde no existen posibilidades de que parte de la nube de trazador viaje hacia aguas arriba del canal.

**Figura 4.15:**  
**Puntos de inyección.**



Para las experiencias se utilizó un caudal de 7,1 [l/s]. Además las inyecciones fueron hechas en serie y a intervalos de tiempo conocidos para cada punto de medición y para cada punto de inyección, siendo siempre inyecciones de 1 [l] de solución con una concentración de 200 [gr/l] de trazador.

Los resultados obtenidos para el primer grupo de mediciones, es decir, para las mediciones hechas con la inyección de trazador aguas arriba de la compuerta se encuentran en las Tablas 4.17 a 4.19:

**Tabla 4.17: .  
Resultados en el punto 1 con inyección aguas arriba de la compuerta**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/ l ] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|---------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                         | lateral | central      | Lateral |
| 1               | 16919,6                         | 12288,3 | 11,821       | 16,276  |
| 2               | 15995,9                         | 12551,3 | 12,503       | 15,935  |
| 3               | 15963,6                         | 12998,4 | 12,528       | 15,387  |
| 4               | 17115,3                         | 12768,3 | 11,685       | 15,664  |
| <b>Promedio</b> | 16498,6                         | 12651,6 | 12,134       | 15,815  |
| <b>Error</b>    | 3,66%                           | 2,40%   | 3,66%        | 2,40%   |

**Tabla 4.18:  
Resultados en el punto 2 con inyección aguas arriba de la compuerta.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/ l ] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|---------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                         | lateral | central      | lateral |
| 1               | 15439,1                         | 15189,9 | 12,954       | 13,167  |
| 2               | 16139,1                         | 15344,8 | 12,392       | 13,034  |
| 3               | 15872,0                         | 16709,8 | 12,601       | 11,969  |
| 4               | 16289,9                         | 15461,1 | 12,278       | 12,936  |
| 5               | 16283,0                         | 16230,7 | 12,283       | 12,322  |
| <b>Promedio</b> | 15935,0                         | 15676,4 | 12,556       | 12,776  |
| <b>Error</b>    | 2,34%                           | 4,45%   | 2,37%        | 4,28%   |

**Tabla 4.19:  
Resultados en el punto 3 con inyección aguas arriba de la compuerta.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/ l ] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|---------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                         | lateral | central      | lateral |
| 1               | 18151,2                         | 14038,3 | 11,019       | 14,247  |
| 2               | 17832,0                         | 14230,3 | 11,216       | 14,055  |
| 3               | 19035,7                         | 15137,6 | 10,507       | 13,212  |
| 4               | 18426,1                         | 15598,5 | 10,854       | 12,822  |
| 5               | 18517,2                         | 15453,6 | 10,801       | 12,942  |
| <b>promedio</b> | 18361,2                         | 14751,2 | 10,899       | 13,584  |
| <b>Error</b>    | 2,78%                           | 5,02%   | 2,76%        | 4,99%   |

Los resultados obtenidos para el segundo grupo de mediciones, es decir, para las experiencias realizadas inyectando el trazador aguas abajo de la compuerta pueden ser vistas en las Tablas 4.20 a 4.22

**Tabla 4.20:**  
**Resultados en el punto 1 con inyección aguas abajo de la compuerta.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/ l ] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|---------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                         | lateral | central      | lateral |
| 1               | 15557,1                         | 16274,0 | 12,856       | 12,290  |
| 2               | 18516,4                         | 14679,8 | 10,801       | 13,624  |
| 3               | 16925,6                         | 17622,3 | 11,816       | 11,349  |
| 4               | 16335,0                         | 15408,7 | 12,244       | 12,980  |
| <b>Promedio</b> | 16833,5                         | 15996,2 | 11,9         | 12,6    |
| <b>Error</b>    | 7,45%                           | 7,91%   | 7,25%        | 7,76%   |

**Tabla 4.21:**  
**Resultados en el punto 2 con inyección aguas abajo de la compuerta.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/ l ] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|---------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                         | lateral | central      | lateral |
| 1               | 13630,1                         | 13924,1 | 14,673       | 14,364  |
| 2               | 15019,4                         | 13819,7 | 13,316       | 14,472  |
| 3               | 16532,9                         | 14641,0 | 12,097       | 13,660  |
| 4               | 15966,4                         | 13418,5 | 12,526       | 14,905  |
| <b>Promedio</b> | 15287,2                         | 13950,8 | 13,153       | 14,350  |
| <b>Error</b>    | 8,30%                           | 3,65%   | 8,61%        | 3,60%   |

**Tabla 4.22:**  
**Resultados en el punto 3 con inyección aguas abajo de la compuerta.**

| n°              | Área bajo la curva [mg · s/ l ] |         | Caudal [l/s] |         |
|-----------------|---------------------------------|---------|--------------|---------|
|                 | central                         | lateral | central      | lateral |
| 1               | 15704,1                         | 14454,0 | 12,736       | 13,837  |
| 2               | 13469,4                         | 13720,8 | 14,848       | 14,576  |
| 3               | 14555,2                         | 14915,7 | 13,741       | 13,409  |
| 4               | 14461,1                         | 13926,8 | 13,830       | 14,361  |
| 5               | 13352,0                         | 14625,9 | 14,979       | 13,674  |
| <b>Promedio</b> | 14547,4                         | 14254,3 | 13,789       | 14,046  |
| <b>Error</b>    | 6,28%                           | 3,78%   | 6,26%        | 3,75%   |

Es posible ver de los resultados anteriores que los caudales obtenidos con el aforo químico no cambian en gran medida al cambiar el punto de inyección. Los caudales se mantienen entorno al valor promedio entre 10 [l/s] y 12 [l/s], el cual sigue siendo diferente del que se obtiene usando la placa orificio del canal.

Nuevamente es posible ver que las áreas bajo la curva de respuesta en la zona lateral son más pequeñas que en la zona central. También es posible notar que estas áreas siguen teniendo diferencias pequeñas, las cuales tienen como valor máximo un 23%, por lo que, aunque aún no existe una mezcla óptima, se sigue obteniendo una mezcla comparable a la obtenida en



experiencias anteriores. Salvo los resultados del Punto 2, se obtiene una mejoría en la mezcla al inyectar la solución trazadora aguas abajo de la compuerta. En el Punto 2 se obtienen resultados no esperados, ya que, para el caso de la inyección aguas arriba de la compuerta, las áreas obtenidas son casi iguales en el centro y en uno de los lados del flujo, es decir, la mezcla es casi perfecta, lo cual se vio anteriormente en el punto 4.6.3 que no sucedería (ver tabla 4. 23). Debido a esta contradicción en los datos no es posible obtener resultados concluyentes.

**Tabla 4.23:**  
**Diferencia del área bajo la curva en el centro y en la zona lateral del flujo.**

| Experiencia | Área bajo la curva de respuesta<br>[mg · s/l ] |          | diferencia |
|-------------|--|----------|------------|
|             | central  | lateral  |            |
| 1a          | 16498,60                                       | 12651,56 | 23,32%     |
| 1b          | 16833,51                                       | 15996,22 | 4,97%      |
| 2a          | 15935,02                                       | 15676,37 | 1,62%      |
| 2b          | 15287,22                                       | 13950,81 | 8,74%      |
| 3a          | 18392,43                                       | 14891,65 | 19,03%     |
| 3b          | 14308,36                                       | 14328,64 | 0,14%      |

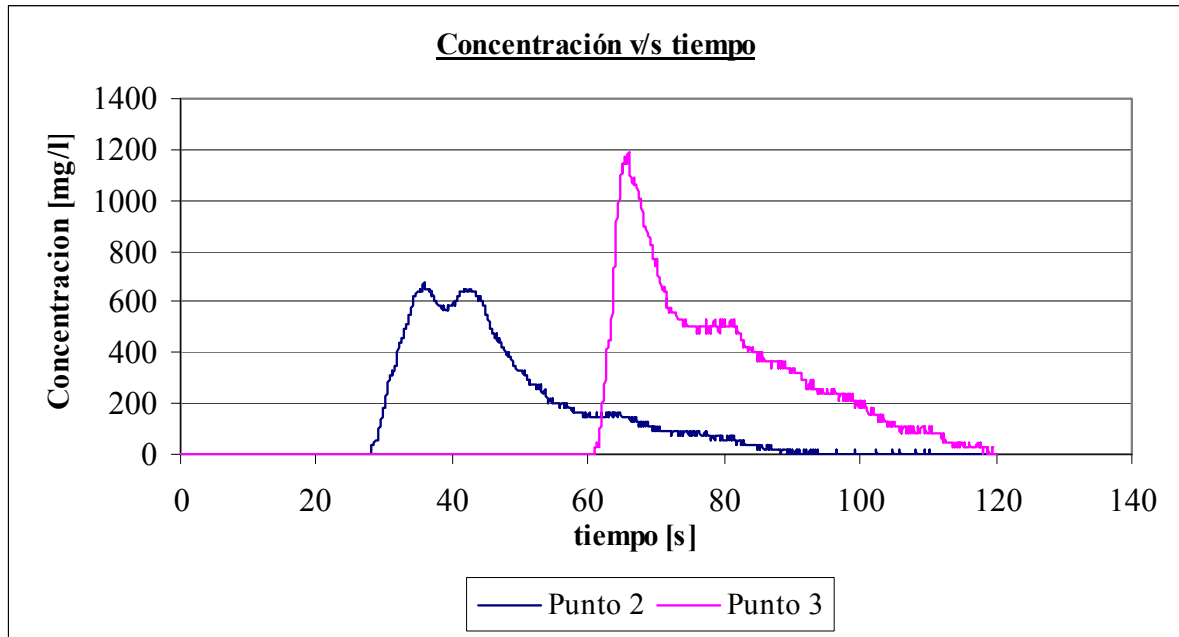
donde:

a: experiencia con inyección aguas arriba de la compuerta.

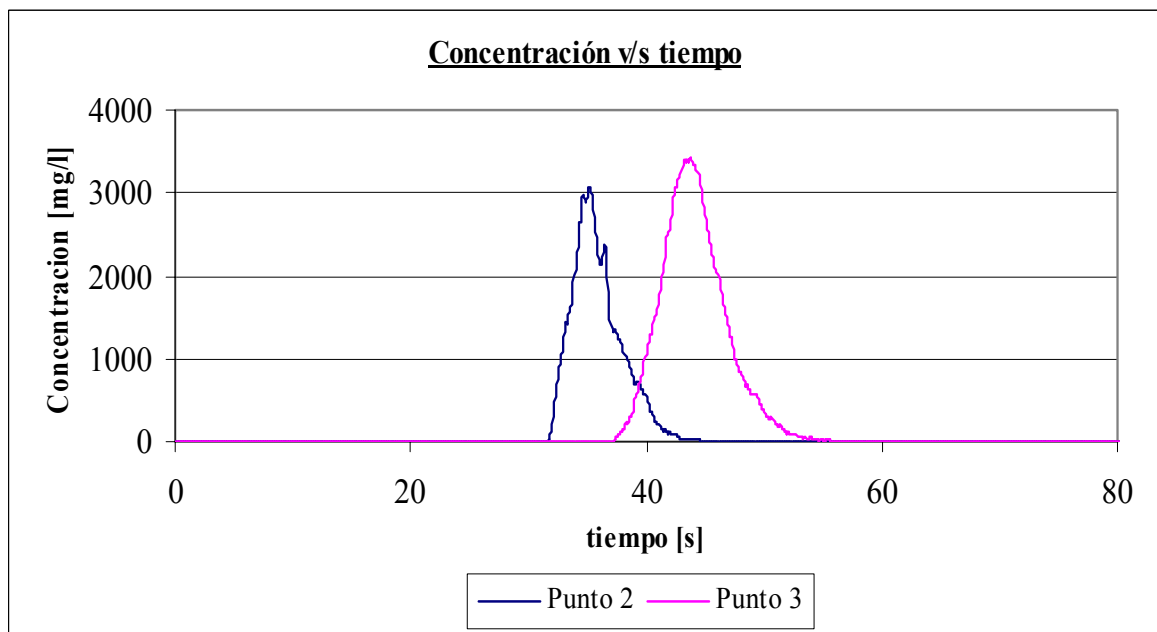
b: experiencia con inyección aguas abajo de la compuerta.

Es posible notar que al inyectar el trazador aguas abajo de la compuerta y antes del resalto se obtienen curvas de respuesta más definidas y compactas, donde el peak alcanza valores mucho más altos. Al ser vertida la solución trazadora en una zona en que el escurrimiento ocurre en forma de río, parte de la nube viaja aguas arriba del punto de inyección, lo que hace que la nube se alargue y sea necesario más tiempo para la medición. Por otro lado al verter la solución en una zona de torrente se obliga al trazador a viajar aguas abajo del punto de inyección, por lo que no existe una dispersión inicial importante, produciéndose curvas más compactas. A modo de ejemplo se presenta una comparación de las curvas en la Figura 4.16 y 4.17:

**Figura 4.16:**  
**Curvas medidas con inyección aguas arriba de la compuerta.**



**Figura 4.17:**  
**Curvas medidas con inyección aguas abajo de la compuerta.**



#### 4.7. Análisis de Resultados

Existen diferentes causas que pueden explicar las diferencias en los resultados obtenidos con el aforo químico y con la placa orificio, sin embargo es importante tener en cuenta que no existe una variación importante en los valores de los caudales obtenidos con el aforo químico, por lo que cualquier fuente de error podría ser considerada como sistemática. Entre las posibles fuentes de error se destacan las siguientes:

- Problemas de medición con el conductivímetro: para la realización de los aforos químicos en el canal se utilizó un conductivímetro modelo Schott LF5100, el cual funciona a través de una interfaz con un computador y permite obtener mediciones en tiempo real. Para poder analizar si las mediciones hechas con este instrumento son correctas, se compararon algunos datos utilizando un sensor de conductividad independiente, el cual viene incluido en el medidor multiparámetros Multi 340i. Al analizar los resultados obtenidos fue posible ver que los valores de conductividad medidos con ambos instrumentos son muy similares, por lo que se pueden asumir correctos. Según esto se puede descartar este factor como razón de la diferencias entre los aforos.
- Pérdidas de trazador: las experiencias se realizaron en un canal cerrado de recirculación, que no presenta afluentes o efluentes y que no tiene interferencias de ningún tipo en el flujo. Según esto, no se deberían producir pérdidas de parte de la nube en algún punto del escurrimiento.
- Problemas en las metodologías de cálculo: los procedimientos fueron revisados cuidadosamente y no fue posible encontrar una fuente de error que produjera tantas variaciones en el caudal aforado.

Dado que los factores de error anteriores no resultaron ser una razón clara de la diferencia entre los valores de caudal medidos con ambos métodos, fue necesario analizar el nivel de mezcla del trazador en las distintas secciones de control. Las experiencias mostraron que la mezcla no es completa en las secciones de control, sin embargo, si analizamos los resultados de la Tabla 4.15 podemos ver que en una condición de mezcla completa el caudal tendería a un valor cercano a 9,06 [l/s], el cual sería un 55% mayor que el valor entregado por la placa orificio. Según lo anterior, si la mezcla mejorará, el valor del caudal obtenido no se acercaría al real.

El caudal obtenido con aforos químicos de inyección instantánea puede ser influenciado por tres grandes variables: la masa, la medición de la conductividad y el intervalo de tiempo entre las mediciones. Esto puede ser visto en la Ecuación 3.8, es decir:

$$Q \approx \frac{M}{\Delta t \cdot \sum (C_i - C_b)}$$

Al haber descartado la masa, la medición de la conductividad como fuente de error es posible que exista un problema con el sistema de adquisición de datos. Como la diferencia entre el caudal aforado con trazador y con la placa orificio fue sistemáticamente cercana al 50% de resultado del aforo químico, es posible que exista un problema con el intervalo de tiempo en el cual se entregan las mediciones. El programa entregó mediciones cada 0,1 [s], sin embargo se puede haber dado el caso que el intervalo de tiempo real haya sido de 0,2 [s], lo que produciría un error del doble en los resultados de los aforos. Esta fuente de error se analizó en el mismo programa, intentando cambiar las condiciones de fábrica sin lograr resultados concluyentes. Además se contacto a personas que hayan trabajado con estos equipos pero no existían trabajos en que se considerara esto como fuente de error.

A pesar de lo anterior, es claro que existe un problema sistemático con las mediciones y, aunque no fue posible corroborarlo, una de las opciones más claras que pueden explicar las diferencias obtenidas en la experimentación, es la existencia de problemas con el sistema de adquisición de datos.

---

**CAPÍTULO 5**  
**EXPERIENCIAS EN TERRENO**

---

## 5. EXPERIENCIAS EN TERRENO

A continuación se presenta una discusión sobre las experiencias realizadas en un canal efluente del canal Las Mercedes. A través de estas experiencias se pretende analizar la aplicación del método de aforo químico en un cauce en que las condiciones de escurrimiento no son controlables como en el caso del laboratorio.

El método utilizado para hacer aforos químicos fue el de inyección instantánea, el cual se encuentra descrito en el Capítulo 3, mientras que el trazador utilizado fue el Cloruro de Sodio.

### 5.1. Aspectos Generales.

#### 5.1.1 Descripción del lugar.

En 1873, se iniciaron las obras del canal Las Mercedes destinado a regar los sectores de Lo Prado, Bustamante y Curacaví a través del desvío de aguas desde el río Mapocho. Su construcción tardó más de 30 años, incluyó 120 [km] de canal con capacidad inicial para 6 [m<sup>3</sup>/s], la mayor parte de ellos en faldeos de cerro, 3 túneles de 300, 1.200 y 1.500 metros de longitud.

Las experiencias se realizaron en un sector llamado La Aurora, el cual se ubica entre el túnel Lo Prado y Curacaví (ver figura 5.1). Al lugar de trabajo se llega a través de un camino rural de aproximadamente 650 [m].

**Figura 5.1:**  
**Ubicación general del lugar de las experiencias.**



**Figura 5.2:**  
**Mapa de acceso y sector del canal.**

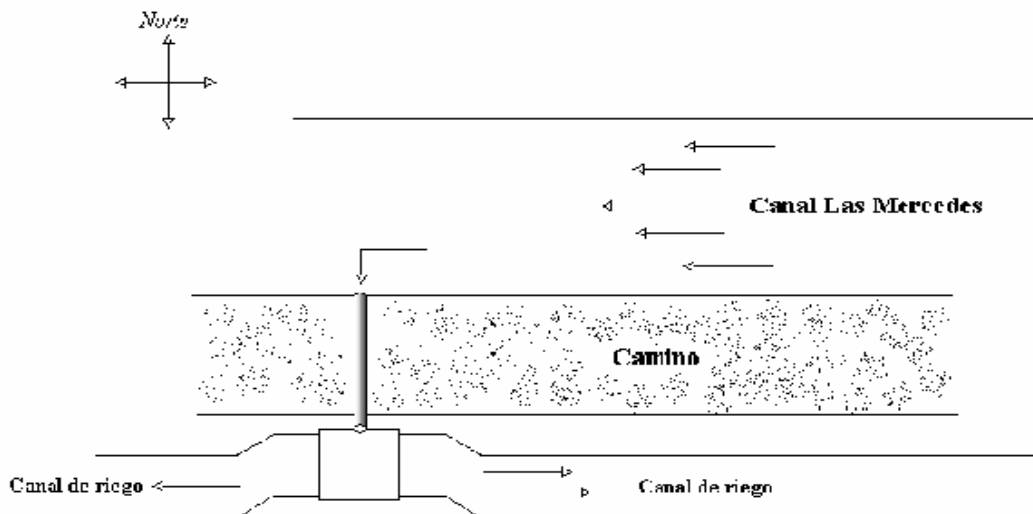


En este sector el canal Las Mercedes tiene una pequeña bocatoma que alimenta dos canales que desvían agua para el riego de los campos de la zona (ver Figura 5.3 y Figura 5.4). Las experiencias se realizaron en el canal que escurre en dirección Oeste-Este, el cual tiene un largo aproximado de 270 [m], un ancho promedio de 1 [m] y una altura de agua promedio de 20 [cm].

**Figura 5.3:**  
**Descripción del canal.**



**Figura 5.4:**  
**Esquema de la bocatoma.**



El canal utilizado para las mediciones fue elegido ya que presenta una serie de ventajas con respecto a otros, entre ellas: fácil acceso, buen espacio para el manejo de equipos, poca vegetación en el interior del canal, no presenta afluentes o efluentes en la zona de estudio, entre otras. En la Figura 5.5 podemos ver un esquema del canal, así como las secciones de control y otros puntos relevantes. Los puntos utilizados para las experiencias en terrenos se describen a continuación:

C: Captación o bocatoma. En un punto ubicado a 2 [m] aguas abajo del afluente se realizaron las inyecciones de trazador.

1: primer punto de medición para el método de aforo químico. Se ubica aproximadamente a 40 [m] de la captación. También se realizaron mediciones con el molinete.

2: segundo punto de medición para el método de aforo químico. También se realizó un aforo con molinete en este punto. Se ubica aproximadamente a 82 [m] de la captación (ver Figura 5.5).

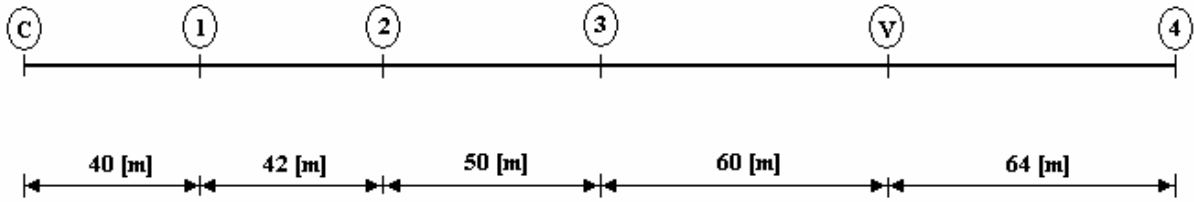
3: tercer punto de medición para el método de aforo químico. Se ubica a 132 [m] de la captación.

V: zona de vegetación en el canal (ver fotos en Figura 5.7).

4: cuarto punto de medición para el método de aforo químico y el molinete. Se ubica aproximadamente a 256 [m] de la captación.



**Figura 5.5:**  
**Distancia entre secciones de control del canal.**



**Figura 5.6:**  
**Fotos del punto de medición 2.**



**Figura 5.7:**  
**Fotos de la zona de vegetación del canal.**



## 5.1.2 Instrumentos

### 5.1.2.1 Molinete

El molinete Gurley 622A utilizado para las experiencias es fabricado por la empresa Gurley Precision Instruments. Algunas de las características más importantes se presentan a continuación:

- Puede operar en un rango de velocidades de 0,06 a 7,6 [m/s].
- Tiene una hélice de 12,7 [cm] de diámetro, donde cada sección de la hélice mide 5,08 [cm] de diámetro.
- Consta de 4 secciones de barras de 50 [cm] cada una.
- Tiene audífonos para contar las revoluciones de la hélice.

**Figura 5.8:**  
**Fotos del molinete utilizado en el estudio.**



La exactitud del instrumento entregada por el fabricante es del 2%. Este valor puede variar según el mantenimiento y los cuidados dados al molinete.

### 5.1.2.2 Conductivímetro portátil Multi 340i.

El conductivímetro portátil que fue utilizado para las experiencias viene incluido en el set de sensores del instrumento portátil de medición Multi 340i. Este instrumento tiene la capacidad de realizar las siguientes mediciones:

- PH y Redox.

- Medición del contenido de oxígeno disuelto en el agua.
- Medición de conductividad, salinidad y temperatura.

La célula conductímetra que utiliza este instrumento es la TetraCon 325, la cual, al ser utilizada con el instrumento Multi 340i puede entregar valores en los rangos y con los errores indicados en las tablas 5.1 y 5.2:

**Tabla 5.1:  
Rango de medición y resolución del conductímetro.**

|   | Rango de medición |        | Resolución |
|---|-------------------|--------|------------|
|   | Mínimo            | Máximo |            |
| Conductividad [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | 0                 | 1999   | $\pm 1$    |
| Conductividad [ $\text{mS}/\text{cm}$ ]   | 0                 | 19,99  | $\pm 0,01$ |
|   | 0                 | 199,0  | $\pm 0,1$  |
|   | 0                 | 500    | $\pm 1$    |
| Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]        | -5,0              | 105,0  | $\pm 0,1$  |

**Tabla 5.2:  
Error del conductímetro.**

|                                    | Error | T [ $^{\circ}\text{C}$ ] del medio a medir |        |
|------------------------------------|-------|--|--------|
|                                    |       | Mínimo                                     | Máximo |
| Conductividad                      | 0,5 % | 0  | 35     |
|                                    | 0,5 % | 35   | 50     |
| Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] | 0,1   |  |        |

Este aparato presenta varias ventajas en su utilización, tales como: evaluación automática del estado de la calibración, medición simultánea de la conductividad y la temperatura, almacenamiento en la memoria de las mediciones hechas, fácil operación en terreno, entre otras.

### 5.1.2.3 Otros

Para las experiencias en terreno también se utilizaron otros equipos como: botellas de muestreo de 50 [ $\text{cm}^3$ ], un bidón de 25 [l], cronómetro, una huincha de 7,5 [m] de largo, una balanza, entre otros.

## 5.2. Detalle de las Experiencias.

Las experiencias en terreno se realizaron en dos días distintos, el 7 de febrero de 2007 y el 23 de febrero del 2007. En cada uno de estos días se realizaron mediciones con el molinete para estimar la velocidad de escurrimiento y el caudal, y mediciones con el método de aforo químico con inyección instantánea de trazador, de forma de poder comparar los resultados obtenidos con

ambos métodos. El primer día se trabajó principalmente en los puntos: C, 1, 2 y 3; mientras que el segundo día se trabajó en los puntos: C, 2 y 4.

### **5.2.1 Experiencias con molinete y cálculo del caudal.**

Para poder estimar los caudales utilizando el molinete fue necesario definir ciertos puntos del canal que fueran adecuados para una correcta utilización del instrumento. Debido a esto se definieron lugares que permitieran un manejo fácil de los instrumentos, sin vegetación importante, con una altura de escurrimiento adecuada para la ubicación del molinete, con un ancho que permitiera la medición en diferentes subsecciones, entre otras. Según estas condiciones se encontraron tres puntos adecuados, estos son: Puntos 1, Puntos 2 y Punto 4.

En los distintos puntos se siguió un procedimiento similar para el cálculo del caudal, el cual es descrito a continuación:

- Primero se ubica el lugar y se mide el ancho de la superficie libre utilizando la huincha. Además se mide de forma estimativa la altura de escurrimiento. Según lo anterior se definen cuantas subsecciones se utilizarán en el aforo.
- Una vez que las subsecciones están definidas se determinan los puntos medios de cada una de ellas, de forma de fijar los puntos en los cuales se ubicará el molinete.
- Luego se mide, en cada uno de los puntos fijados, la altura de escurrimiento y las revoluciones de la hélice del molinete en un lapso de tiempo de al menos 1 [min]. Las mediciones se realizan a 60% de la altura de agua medida desde el fondo del canal.
- Utilizando la tabla de transformación del molinete hecha al calibrar el instrumento, se pasan los valores de revolución de la hélice a velocidad de escurrimiento.
- El área aproximada de cada subsección se estima utilizando las mediciones de altura de escurrimiento y los anchos de las subsecciones (ver Sección 2.2.1).
- Con los valores de área y velocidad para cada subsección se calcula el caudal en cada una de ellas. El caudal total se obtiene sumando los caudales de las subsecciones.

Siguiendo el procedimiento antes descrito se obtuvieron los datos necesarios para el cálculo del caudal. La primera medición se realizó el día 7 de febrero de 2007 en el punto 1. Aquí se midió un ancho del canal de 1,2 [m] y una altura aproximada de agua de 20 [cm]. Según esto se definieron tres subsecciones de aforo. Los detalles de las mediciones se presentan en las Tablas 5.3 a 5.5:

**Tabla 5.3:  
Mediciones con molinete en el punto 1.**

| Subsección | Punto medición [m] | Revoluciones | tiempo [s] | Altura escurrimiento [m] |
|------------|--------------------|--------------|------------|--------------------------|
| 1          | 0,2                | 28           | 62,87      | 0,2                      |
| 2          | 0,6                | 31           | 63,91      | 0,24                     |
| 3          | 1                  | 13           | 65,85      | 0,21                     |

**Tabla 5.4:  
Resultados de mediciones del punto 1 para cada subsección.**

| Subsección | Punto medición [m] | velocidad [m/s] | Área subsección [m <sup>2</sup> ] | Caudal subsección [l/s] |
|------------|--------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1          | 0,2                | 0,310 ± 0,006   | 0,062 ± 0,001                     | 19 ± 1                  |
| 2          | 0,6                | 0,336 ± 0,007   | 0,093 ± 0,003                     | 31 ± 2                  |
| 3          | 1                  | 0,144 ± 0,003   | 0,065 ± 0,004                     | 9 ± 1                   |

**Tabla 5.5:  
Resultados de las mediciones en el punto 1.**

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| Área escurrimiento [m <sup>2</sup> ] | 0,22 ± 0,01 |
| Velocidad [m/s]                      | 0,27 ± 0,03 |
| Caudal [l/s]                         | 60 ± 3      |

Las mediciones hechas en el Punto 2 y 4 se realizaron el 23 de febrero del 2007. En ellas se midió con el molinete al 60% de la altura de agua y en la superficie, de forma de poder hacer un perfil de velocidades en la sección. En el punto 2 se midió un ancho de 1,2 [m] y una altura de agua aproximada de 18 [cm], con lo cual se definieron 4 subsecciones aforo. En el punto 4 se midió un ancho de 0,7 [m] y una altura de agua aproximada de 18 [cm], con lo cual las subsecciones fijadas fueron tres. Los datos medidos se pueden ver a continuación:

**Tabla 5.6:  
Mediciones con molinete en el punto 2.**

| Subsección | Punto medición [m] | Mediciones a 60% h |            | Mediciones a 100% h |            | Altura escurrimiento [m] |
|------------|--------------------|--------------------|------------|---------------------|------------|--------------------------|
|            |                    | Revoluciones       | tiempo [s] | Revoluciones        | tiempo [s] |                          |
| 1          | 0,15               | 17                 | 66,84      | 19                  | 63,94      | 0,13                     |
| 2          | 0,45               | 35                 | 63,39      | 36                  | 64,06      | 0,19                     |
| 3          | 0,75               | 32                 | 63,15      | 34                  | 63,94      | 0,19                     |
| 4          | 1,05               | 27                 | 63         | 24                  | 64,17      | 0,14                     |

**Tabla 5.7:  
Resultados de mediciones del punto 2 para cada subsección.**

| Subsección | Punto medición [m] | velocidad [m/s] |             | Área subsección [m <sup>2</sup> ] | Caudal subsección [l/s] |
|------------|--------------------|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------|
|            |                    | 60% h           | 100% h      |                                   |                         |
| 1          | 0,15               | 0,18 ± 0,01     | 0,21 ± 0,01 | 0,032 ± 0,001                     | 5,8 ± 0,3               |
| 2          | 0,45               | 0,38 ± 0,01     | 0,38 ± 0,01 | 0,055 ± 0,002                     | 21 ± 1                  |
| 3          | 0,75               | 0,34 ± 0,01     | 0,37 ± 0,01 | 0,055 ± 0,004                     | 19 ± 2                  |
| 4          | 1,05               | 0,29 ± 0,01     | 0,26 ± 0,01 | 0,033 ± 0,004                     | 10 ± 2                  |

**Tabla 5.8:  
Resultados de las mediciones en el punto 2.**

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| Área escurrimiento [m <sup>2</sup> ] | 0,18 ± 0,01 |
| Velocidad [m/s]                      | 0,31 ± 0,05 |
| Caudal [l/s]                         | 55 ± 5      |

**Tabla 5.9:  
Mediciones con molinete en el punto 4.**

| Subsección | Punto medición [m] | Mediciones a 60% h |            | Mediciones a 100% h |            | Altura escurrimiento [m] |
|------------|--------------------|--------------------|------------|---------------------|------------|--------------------------|
|            |                    | Revoluciones       | tiempo [s] | Revoluciones        | tiempo [s] |                          |
| 1          | 0,12               | 42                 | 61,29      | 34                  | 62,79      | 0,18                     |
| 2          | 0,35               | 51                 | 60,68      | 44                  | 60,96      | 0,18                     |
| 3          | 0,58               | 46                 | 61,97      | 45                  | 61,05      | 0,18                     |

**Tabla 5.10:  
Resultados de mediciones del punto 4 para cada subsección.**

| Subsección | Punto medición [m] | velocidad [m/s] |             | Área subsección [m <sup>2</sup> ] | Caudal subsección [l/s] |
|------------|--------------------|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------|
|            |                    | 60% h           | 100% h      |                                   |                         |
| 1          | 0,12               | 0,46 ± 0,01     | 0,37 ± 0,01 | 0,032 ± 0,001                     | 15 ± 1                  |
| 2          | 0,35               | 0,58 ± 0,01     | 0,50 ± 0,01 | 0,042 ± 0,001                     | 24 ± 1                  |
| 3          | 0,58               | 0,51 ± 0,01     | 0,50 ± 0,01 | 0,032 ± 0,003                     | 16 ± 2                  |

**Tabla 5.11:  
Resultados de las mediciones en el punto 4.**

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| Área escurrimiento [m <sup>2</sup> ] | 0,11 ± 0,01 |
| Velocidad [m/s]                      | 0,53 ± 0,06 |
| Caudal [l/s]                         | 55 ± 4      |

Es posible ver en los resultados anteriores que no existe un cambio en el valor del caudal del canal en el periodo de tiempo entre los días en que se efectuaron las mediciones. Esto se puede deber a que, como se trata de canales de riego, es necesario mantener un caudal constante para las necesidades del sector. Es importante notar que las mediciones hechas el día 23 de febrero en dos puntos diferentes entregaron una estimación del caudal bastante similar, por lo que se puede asegurar que este valor es una estimación adecuada.

La incerteza obtenida para los caudales estimados con el molinete es cercana al 8% en todos los casos. Este error en las estimaciones, relacionado con los instrumentos y su manipulación, puede generar ciertas diferencias con el caudal obtenido con el método de aforo químico.

### 5.2.2 Aforo químico.

Los aforos químicos se realizaron utilizando Cloruro de Sodio como trazador, en distintos puntos a lo largo del canal y durante los dos días en los que se efectuaron las mediciones. Las inyecciones de trazador se realizaron en un punto muy cercano a la bocatoma del canal que traspasa agua desde el canal Las Mercedes hacia el canal de riego, cuidando que la turbulencia generada por la llegada del agua al canal no afecte la inyección del trazador. Las mediciones fueron hechas en los siguientes puntos de medición: punto 1, 2, 3 y 4, estando el equipo de trabajo compuesto por 2 personas el 23 de febrero y por 1 el 7 del mismo mes. A continuación se describe el procedimiento utilizado:

- Primero se definió cual iba a ser la cantidad de trazador que sería utilizado en la inyección. Para esto hay que tomar en cuenta el caudal, la distancia a la mezcla en el canal, la distancia a la cual se haría la medición, el valor peak de conductividad que se desea obtener con las mediciones, entre otros. Como aproximación de la distancia a la mezcla óptima se utilizó la Ecuación 3.18, ya que es una estimación simplificada, que no considera datos como pendiente o coeficiente de Manning, los cuales no fue posible obtener. Los datos utilizados para estas estimaciones fueron los obtenidos el 7 de febrero en el punto 1 y el 23 de febrero en el punto 2, ya que el escurrimiento en estos puntos es similar y refleja más claramente la situación general del canal. Las estimaciones son las siguientes:

**Tabla 5.12:**  
**Estimación de la distancia a la mezcla óptima.**

|                               | 7 de febrero<br>de 2007 | 23 de febrero<br>de 2007 |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| <b>h [m]</b>                  | 0,217                   | 0,163                    |
| <b>b [m]</b>                  | 1,2                     | 1,2                      |
| <b>v [m/s]</b>                | 0,272                   | 0,314                    |
| <b>Q [m<sup>3</sup>/s]</b>    | 0,059                   | 0,055                    |
| <b>L<sub>mezcla</sub> [m]</b> | 11,86                   | 18,24                    |

Aunque los datos son estimativos, sirven para tener una idea del orden de magnitud de la distancia a la mezcla óptima. Es posible ver que la mezcla ocurriría relativamente rápido, por lo cual no sería necesario inyectar una cantidad grande de trazador. Según esto se definió que para los puntos 1, 2 y 3 del canal se utilizaría una masa de trazador de 1 [kg] aproximadamente, mientras que en el punto 4 se utilizaría una masa de 2 [kg]. La principal razón de esta diferencia es intentar asegurar que en el punto 4 se obtengan mediciones de conductividad que permitan una buena caracterización de la curva de respuesta del trazador, teniendo presente que debido a la distancia entre el punto

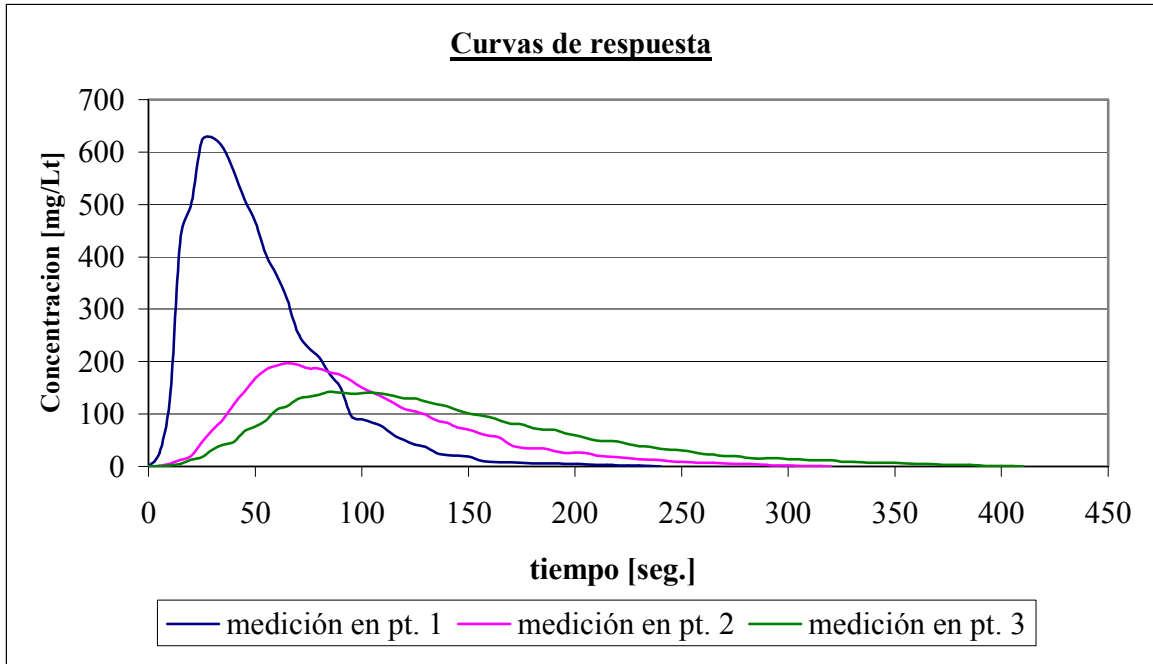
de inyección y el punto 4 la mezcla podía ser tal que generara una curva de respuesta muy plana y sin un peak claramente detectable.

- Una vez que la masa de trazador a inyectar estuvo definida, se hizo una solución de trazador con agua del canal, de manera de lograr una concentración aproximada de sal de 200 [gr/l], lo cual es cercano a la concentración de saturación.
- Cuando la solución estuvo lista se ubicó el conductivímetro en el punto de medición y se inyectó la solución con la masa de trazador correspondiente. Se utilizó un cronometro para medir el tiempo entre la inyección y la llegada de la nube de trazador.
- Una vez que la nube de trazador ha llegado al punto de medición, se comienza con el registro de los datos. La conductividad debe ser medida antes de la llegada de la nube de modo de poder tener un registro de la conductividad base en el canal. La conductividad es registrada cada 5 [s], desde antes que la nube alcance el punto de medición y hasta que las medidas vuelven a su valor base. También fue registrada la temperatura del agua al momento de hacer las mediciones.
- Para obtener la concentración de sal se sigue un procedimiento como el descrito en la Sección 3.2.1, donde el coeficiente de transformación utilizado para pasar de conductividad a concentración es 0,672.

El procedimiento descrito anteriormente fue el mismo para todos los puntos de medición y para cada experiencia de aforo químico realizado. Las mediciones hechas en los Puntos 1, 2 y 3 se hicieron el día 07 de febrero. Los resultados obtenidos este día se pueden ver en la Figura 5.9 y Tablas 5.13 a 5.15, mientras que el total de los datos obtenidos en las mediciones se pueden ver en el Anexo B:



**Figura 5.9:**  
**Curvas de respuesta de los aforos químicos en los puntos 1, 2 y 3.**



**Tabla 5.13:**  
**Resultado del aforo químico en el punto 1.**

|                               | Valor              |
|-------------------------------|--------------------|
| Masa [mg]                     | 1.000.000 ± 20.000 |
| Área bajo la curva [mg · s/l] | 25.000 ± 1.000     |
| Q [l/s]                       | 41 ± 3             |

**Tabla 5.14:**  
**Resultado del aforo químico en el punto 2.**

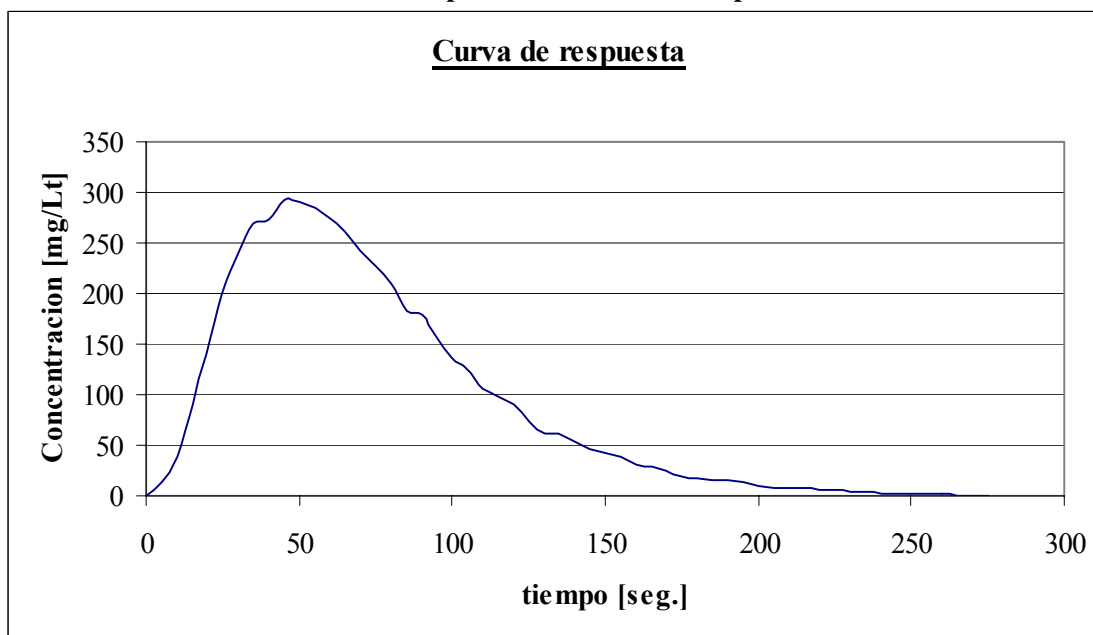
|                               | Valor            |
|-------------------------------|------------------|
| Masa [mg]                     | 900.000 ± 20.000 |
| Área bajo la curva [mg · s/l] | 21.000 ± 2.000   |
| Q [l/s]                       | 44 ± 5           |

**Tabla 5.15:**  
**Resultado del aforo químico en el punto 3.**

|                               | Valor            |
|-------------------------------|------------------|
| Masa [mg]                     | 940.000 ± 20.000 |
| Área bajo la curva [mg · s/l] | 22.000 ± 2.000   |
| Q [l/s]                       | 43 ± 5           |

Las mediciones hechas el 23 de febrero se hicieron en los puntos 2 y 4. En este último se realizaron dos aforos químicos de forma de poder comprobar los datos obtenidos. El total de los datos obtenidos se pueden ver en el Anexo B, mientras que los resultados se presentan en las Figuras 5.10 y 5.11 y Tablas 5.16 a 5.18:

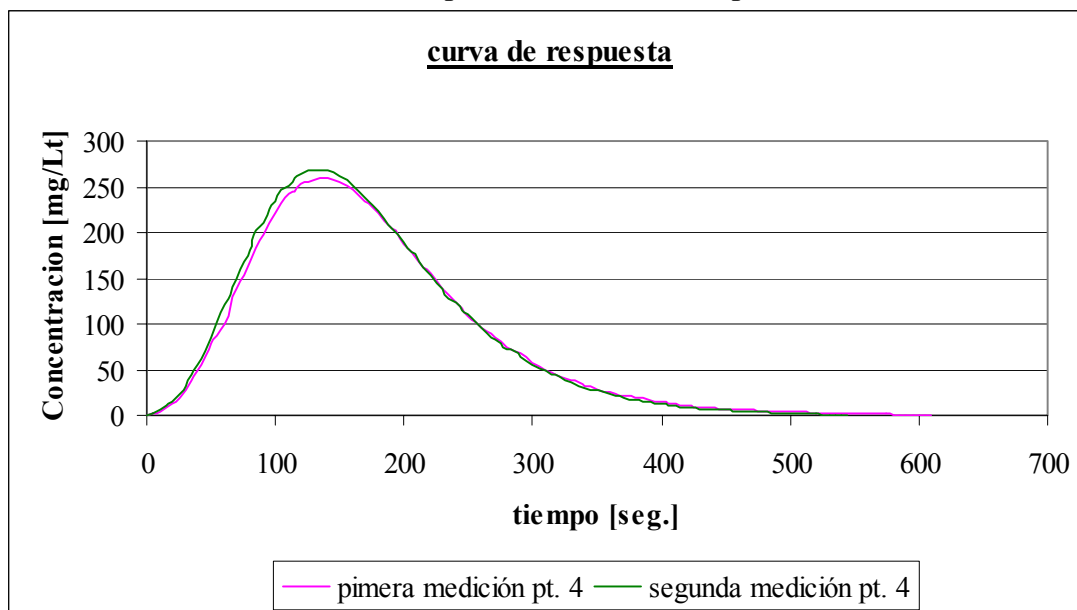
**Figura 5.10:**  
**Curva de respuesta obtenida en el punto 2.**



**Tabla 5.16:**  
**Resultado del aforo químico en el punto 2.**

|                               | Valor              |
|-------------------------------|--------------------|
| Masa [mg]                     | 1.000.000 ± 20.000 |
| Área bajo la curva [mg · s/l] | 25.000 ± 2.000     |
| Q [l/s]                       | 40 ± 4             |

**Figura 5.11:**  
**Curvas de respuesta obtenida en el punto 4.**



**Tabla 5.17:**  
**Resultado del primer aforo químico en el punto 4.**

|                                 | Valor              |
|---------------------------------|--------------------|
| Masa [mg]                       | 2.000.000 ± 20.000 |
| Área bajo la curva [mg · s / l] | 48.000 ± 4.000     |
| Q [l/s]                         | 42 ± 4             |

**Tabla 5.18:**  
**Resultado del segundo aforo químico en el punto 4.**

|                                 | Valor              |
|---------------------------------|--------------------|
| Masa [mg]                       | 2.000.000 ± 20.000 |
| Área bajo la curva [mg · s / l] | 50.000 ± 4.000     |
| Q [l/s]                         | 41 ± 3             |

### 5.3. Análisis de Resultados.

A medida que el trazador avanza con el flujo, la dilución produce que la nube deje de estar concentrada en un punto, desplazándose parte de esta masa hacia los extremos. La Figura 5.9 muestra un claro efecto de la dilución del trazador en el canal, produciéndose nubes menos concentradas y más alargadas a medida que nos alejamos del punto de inyección.

Al analizar los caudales obtenidos con el aforo químico según el día en que se realizó la medición (ver Tabla 5.19), podemos notar que se obtuvieron valores muy similares, teniendo en

cuenta que en ciertos casos las diferencias entre ellos son comparables con los errores estimados. Esto hace suponer que existe un nivel de mezcla adecuado después del punto 1, haciendo que los valores no varíen de manera importante. Este punto es muy importante ya que la falta de mezcla es un importante factor de error que hay que controlar y al ser descartado permite realizar una comparación entre los aforos químicos y con molinete de una manera más segura.

Si comparamos los valores obtenidos con el molinete y con el aforo químico (ver Tablas 5.19 y 5.20) podemos notar que el primer método entregó valores mayores al segundo, variando estas diferencias entre 13 y 19 [l/s]. Esta diferencia es importante ya que produciría un error de entre un 24% y un 30%.

**Tabla 5.19:  
Resumen de resultados de los aforos químicos.**

|                        | Punto de medición | Caudal [l/s] |     |
|------------------------|-------------------|--------------|-----|
| 7 de febrero del 2007  | 1                 | 41           | ± 3 |
|                        | 2                 | 44           | ± 5 |
|                        | 3                 | 43           | ± 5 |
| 23 de febrero del 2007 | 2                 | 40           | ± 4 |
|                        | 4                 | 42           | ± 4 |
|                        | 4                 | 41           | ± 3 |

**Tabla 5.20:  
Resumen de resultados de los aforos con molinete.**

|                        | Punto de medición | Caudal [l/s] |     |
|------------------------|-------------------|--------------|-----|
| 7 de febrero del 2007  | 1                 | 60           | ± 3 |
| 23 de febrero del 2007 | 2                 | 55           | ± 5 |
|                        | 4                 | 55           | ± 4 |

El canal fue revisado en toda su extensión y no fue posible identificar puntos en que hubiera problemas de aguas afluentes o efluentes. Además la zona de vegetación más densa se presenta en la zona V del canal (ver Figura 5.3), por lo que el único punto que podría verse influenciado sería el Punto 4. Sin embargo al revisar los resultados de los aforos químicos hechos en este lugar, es posible notar que no presentan diferencias importantes con respecto a las otras medidas hechas en el canal, por lo cual no sería una causa de la diferencia en los resultados.

Un factor de error puede darse en lo difícil que resulta contabilizar de manera exacta la nube de trazador en el punto de medición. Al tratarse de un procedimiento manual pueden existir problemas de manipulación de instrumentos. Si bien se intento manejar con cuidado los instrumentos y la toma de datos, puede haber problemas no controlables.

Otra fuente de error se produce al determinar la velocidad media del escurrimiento, lo cual puede deberse principalmente a dos razones. La primera es asumir que la velocidad media se encuentra al 60% de la altura de escurrimiento y la segunda sería un posible error en la calibración del instrumento.

Si vemos los datos de la Tabla 5.7 podemos ver que las mediciones hechas con el molinete al 60% de la altura y al fondo del canal entregaron valores similares, sin embargo puede existir un error al asumir que la velocidad media puede estimarse a partir de estas mediciones, ya que no se conoce de manera exacta el perfil de velocidades. Esto puede haber generado que las estimaciones de la velocidad media se hayan sobredimensionadas, obteniéndose valores de caudales mayores a los reales.

Por otro lado la calibración del molinete se supuso correcta, lo que en la práctica puede haber producido diferencias con los caudales reales. El instrumento utilizado es un instrumento de terreno, el cual ha sido utilizado en varias ocasiones, por lo que la curva de calibración del instrumento puede haber perdido validez.

---

**CAPITULO 6**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## **6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.**

### **6.1. Resultados y Conclusiones.**

Existen distintos instrumentos que permiten medir el caudal pasante en un cauce, los cuales presentan distintos niveles de exactitud y condiciones de operación. Entre ellos encontramos sistemas convencionales, como: molinetes y tubos de Pitot, sistemas donde se interviene el cauce, como: vertederos y canaletas, sistemas modernos como los ADP y metodologías de aforo químico. Una de las principales ventajas que presentan estos últimos es que no se necesita conocer el área de la sección de escurrimiento en el punto de medición.

Para poder medir la recarga desde un cauce superficial es necesario tener una muy buena aproximación del caudal pasante, de forma que el error de la medición anterior no sea comparable con la estimación de la infiltración. Muchas veces los métodos usados para medir los caudales en distintos canales o ríos no son muy exactos, produciendo que la estimación de la recarga pierda validez. Debido a esto, en este trabajo se analizaron distintos sistemas de aforo, centrando el trabajo en la aplicación de un método de aforos químicos con trazadores en cauces superficiales y aplicando esta última metodología en la medición de la infiltración en canales por medio de aforos diferenciales.

Las conclusiones obtenidas con el desarrollo de este trabajo pueden ser divididas en dos grupos: conclusiones de laboratorio y conclusiones de terreno. En ambos casos se compararon los valores de caudal obtenidos con aforos químicos y con otros métodos convencionales, como: placa orificio y molinete, y se analizó la mezcla del trazador en el canal, comparando las curvas de respuesta del trazador y el caudal obtenido.

Las experiencias de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Hidrodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile. La primera de ellas se hizo midiendo la curva de respuesta del trazador en el centro del canal y en distintos puntos a lo largo de éste. En esta experiencia fue posible ver que no existen grandes diferencias en los valores de las áreas bajo las curvas de respuesta, variando los valores en hasta un 4% con respecto al promedio. También fue posible ver que la estimación del caudal con el método de aforo químico es aproximadamente el doble del obtenido utilizando la placa orificio, lo cual es una diferencia inaceptable.

En la siguiente experiencia de laboratorio se analizó la mezcla en el canal, midiendo las curvas de respuesta del trazador en el centro del flujo y en una zona lateral de éste. Con las mediciones hechas fue posible ver que las áreas bajo la curva de respuesta en estos dos puntos de medición no son iguales y presentan una distorsión entre 10% y 25% con respecto al promedio entre ambas, lo cual es mayor al error del 4% estimado para el método. Además las estimaciones de caudal utilizando las curvas de respuesta medidas en la zona central y lateral de canal son siempre superiores a lo obtenido con la placa orificio.

Se concluye que, si bien existe un grado de mezcla importante, ésta no es completa, por lo que es esperable que los caudales obtenidos con la placa orificio del canal tengan una diferencia

con los obtenidos con el aforo químico. Sin embargo el caudal obtenido con estos aforos químicos es aproximadamente el doble del obtenido con la placa orificio, lo cual no puede deberse a un simple proceso de mezcla sino que existen otros factores influyendo en los resultados.

Si el problema del aforo estuviera relacionado con la mezcla, al medir en el centro del flujo se obtendría un área bajo la curva de respuesta mayor a la de estabilización debido a que la mayoría de la masa de trazador inyectado estaría presente en esta zona, lo que en teoría debería entregar una subestimación del caudal. Sin embargo en laboratorio se trabajó con conductivímetros que entregan valores comprobados y en un ambiente cerrado, que no permite pérdidas de trazador entre el punto de inyección y el de medición, por lo que se pudieron descartar estas razones como fuente de error.

Se identificó como factor de error un problema con el sistema de adquisición de datos. El programa entregó mediciones cada 0,1 [s], sin embargo el intervalo de tiempo real puede haber sido de 0,2 [s], lo que produciría un error del doble en los resultados de los aforos. Este factor fue analizado con personal del laboratorio y a través de experiencias anteriores, sin embargo no fue posible su comprobación. A pesar de lo anterior, el problema con el sistema de adquisición de datos es un elemento muy sensible, que puede ser la causa de las diferencias entre los aforos hechos en laboratorio.

Debido a lo anterior no fue posible validar el método en laboratorio, aunque si fue posible analizar problemas de mezcla y sus factores. Fue clara la influencia de compuertas y resaltos en el grado de mezcla alcanzado en el canal. También fue posible identificar la conveniencia de inyectar el trazador, en la medida de lo posible, en una zona de escurrimiento de torrente, debido a que esto facilita la medición de la curva de respuesta del trazador, ya que se generan nubes compactas y para las cuales se necesitan tiempos de medición menores

También se hicieron experiencias en laboratorio en que se analizó el efecto de inyectar el trazador en puntos con distintas características de escurrimiento, siendo nuevamente medidas las curvas de respuesta del trazador en la zona central y lateral del flujo. Si bien fue posible ver, al igual que en las experiencias anteriores, que existe una diferencia entre las áreas bajo la curva de respuesta, siendo menor la medida en la zona lateral, y que el caudal sigue siendo aproximadamente el doble de lo estimado con la placa orificio, fue posible ver un claro efecto del cambio del punto de inyección en la forma de la curva de respuesta. Si la inyección se hace en una zona de escurrimiento de torrente se obtienen curvas más definidas y compactas ya que el trazador solo puede viajar hacia aguas abajo, mientras que si la inyección se hace en una zona de río sucede que parte de la nube puede viajar aguas arriba del punto de inyección, lo que hace que la nube se alargue y sea necesario más tiempo para la medición.

En las experiencias en terreno se hicieron mediciones con molinete y aforos químicos con inyección instantánea en distintos puntos del canal Las Mercedes, ubicado en las cercanías de Curacaví, de forma de poder analizar la mezcla del trazador en el agua y de comparar los valores de caudal obtenidos por estos dos métodos. Las mediciones hechas con el molinete en distintos



puntos del cauce entregaron valores de caudal muy similares entre ellos, con valores entre 55 y 60 [l/s], y con errores de entre un 5% a un 10%. Los aforos químicos también entregaron valores de caudal muy similares entre ellos, alcanzando valores entre 40 y 44 [l/s], con errores entre un 7% y un 10%. Es claro ver que existe una diferencia entre los resultados de los dos métodos de aforo, siendo mayores los obtenidos con el molinete.

Al comparar los valores obtenidos con el molinete y con el aforo químico podemos notar que las diferencias en los aforos están entre 13 y 19 [l/s]. Esta diferencia es importante ya que produciría un error de entre un 24% y un 30%, siendo mayores los valores obtenidos con el molinete. Como posible fuente de error se analizó la influencia de la vegetación en las mediciones, sin embargo al comparar los resultados obtenidos con los aforos químicos antes y después de una zona de vegetación presente en el canal, no se obtuvieron diferencias importantes.

Debido a lo anterior es claro que existe un error en las estimaciones del caudal, lo cual puede producirse por un problema en la determinación de la velocidad media del escurrimiento. Este error puede deberse principalmente a dos razones, la primera es asumir que la velocidad media se encuentra al 60% de la altura de escurrimiento y la segunda es un posible error en la calibración del instrumento.

Las mediciones hechas con el molinete al 60% de la altura y al fondo del canal entregaron valores similares, sin embargo puede existir un error al asumir que la velocidad media puede estimarse a partir de estas mediciones, ya que no se conoce de manera exacta el perfil de velocidades. Esto puede haber generado que las estimaciones de la velocidad media se hayan sobredimensionado, obteniéndose valores de caudales mayores a los reales. Por otro lado la calibración del molinete se supuso correcta, lo que en la práctica puede haber producido diferencias con los caudales reales. El instrumento utilizado es un instrumento de terreno, el cual ha sido utilizado en varias ocasiones, por lo que la curva de calibración del instrumento puede haber perdido validez.

## **6.2. Comentarios y Recomendaciones.**

El método de aforo químico con inyección instantánea requiere tomar datos suficientes como para poder caracterizar la curva de respuesta en su totalidad y con la mayor exactitud posible. Esto obliga a asumir más posibles errores en la aplicación de esta técnica y en el registro de los datos. Entre los métodos de aforo químico el más exacto es el de inyección constante, ya que no requiere la cuantificación de toda la curva de respuesta del trazador, sino sólo la concentración de equilibrio. Aunque este último método requiere más equipos y es más difícil de aplicar en terreno, puede ser importante analizar la posibilidad de su utilización para aforar, ya que si lo que se busca es obtener un método más preciso, puede ser importante la experimentación con este tipo de técnica. Para no tener que utilizar grandes cantidades de Cloruro de Sodio, puede ser importante la experimentación con otro tipo de trazador que no necesite una gran cantidad de éste en la inyección, de forma de poder generar efectos notorios en el agua del cauce sin incurrir en problemas de tipo logístico, como: transporte, almacenamiento e inyección de grandes masas.

Un punto importante para poder validar y llegar a utilizar en terreno el método de aforo químico es la experimentación en laboratorio. Debido a los problemas que se tuvieron con la realización de las experiencias, no fue posible obtener resultados concluyentes que permitan aceptar la utilización de trazadores para la cuantificación de caudales. Lo anterior lleva a pensar en la necesidad de experimentar en canales más largos y con equipos distintos, de forma de poder asegurar una mezcla completa en el canal, una buena caracterización de la curva de respuesta del trazador, entre otras. La utilización de los mismos equipos para la realización de otras experiencias es recomendada solo si se llevan a cabo revisiones técnicas de éstos, especialmente del sistema de adquisición de datos, de forma de poder descartarlos como factor de error.

La realización de aforos químicos requiere un despliegue de recursos mucho mayor a otros métodos de medición, como por ejemplo el molinete. Las experiencias en terreno fueron hechas en un cauce relativamente pequeño, por lo que no fueron necesarias grandes cantidades de Cloruro de Sodio o de personal. Sin embargo, dependiendo de la estimación preliminar del caudal y de las características del lugar, puede ser necesaria la inyección de grandes cantidades de sal, así como recipientes más grandes para las soluciones, equipos más robustos para la medición y más personal de apoyo. En caso de que las mediciones sean hechas en tiempo real, puede ser necesaria la utilización de computadores personales y generadores eléctricos, lo que dificulta aún más la aplicación del método. Dadas estas razones este método puede ser conveniente de aplicar, previa validación, solo en casos en que los cauces a medir tengan dimensiones y características manejables.

Las experiencias en terreno hechas para este trabajo se centraron en canales de poco caudal, de forma de que los equipos y la cantidad de trazador sean manejables con poco personal. La utilización de un método de aforo químico en situaciones más generales requiere la validación y la experimentación en canales con mayor caudal. Puede ser necesario el análisis de otros tipos de trazadores, de forma que se identifique el trazador más adecuado en cada caso y que el aforo no quede restringido por el manejo de la cantidad de trazador necesaria para la cuantificación del caudal. Entre ellos encontramos isótopos radioactivos y tintas fluorescentes, los cuales pueden ser detectados en concentraciones mucho más bajas que las sales.

La utilización de métodos más modernos, tales como ADP u otros, en la estimación de las velocidades en un cauce puede constituir un punto importante de analizar, ya que estos instrumentos permiten conocer el perfil de velocidades en el canal, lo que permitiría una estimación más exacta del caudal pasante y serviría como método de comparación para los aforos químicos.

En relación con los objetivos de este trabajo, se pudo ver en primera instancia que el método de aforo químico no sería aplicable para la estimación de la infiltración por medio de una diferencia de caudales en dos secciones de medición. Al ser una técnica más compleja tiene asociados más factores de error, por lo cual, si bien en teoría es un método más exacto, habría que controlar muchos factores para obtener un buen resultado. Esta conclusión es solo preliminar, ya que existieron muchos problemas en el desarrollo de este trabajo que no favorecieron la obtención de conclusiones definitivas. Por lo anterior se hace necesario continuar experimentando de forma de poder lograr un resultado concluyente.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón** (1983). "Hidrología subterránea, tomo I". Ediciones Omega S.A., Segunda edición.
- **Kilpatrick, Frederick A. y Cobb, Ernest D.** (1985). "Measurement of discharge using tracers". U.S. Geological Survey.
- **Rantz S. E. y otros** (1982). "Measurement and computation of streamflow: volume I. Measurement of stage and discharge". U. S. Geological Survey.
- **U. S Department of the Interior** (2001). "Water measurement manual". U. S. Department of the Interior, Segunda edición.
- **Kilpatrick, Frederick A. y Wilson Jr., J. F.** (1989). "Measurement of time travel in streams by dye tracing". U.S. Geological Survey.
- **Merz, Juerg y Doppmann, Gregor.** (2006). "Measuring mountain stream discharge using the salt dilution method". International centre for integrated mountain development (ICIMOD).
- **Lund Plantat, Cristian** (1982). "Medición de caudales en conductos cerrados por medio de isótopos radiactivos". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- **Cuellar Mansilla, Jorge F.** (1982). "Medición de caudales con isótopos radiactivos". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- **Olivares Alveal, Marcelo Alberto** (2000). "Estudio analítico-numérico y experimental de la cuña salina en estuarios". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- **Vallejos Alfaro, Julio Roberto** (2001). "Elaboración de bases de diseño tratamiento suelo acuífero (Sat.) Aplicación caso Copiapó". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- **Carrasco Hernandez, Rodrigo Alejandro** (2005). "Estimación de los montos de recarga del acuífero Santiago Norte, apoyándose en metodologías hidrogeoquímicas". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- **De Smelt, F., Brevis W. y Debels P.** (2005). "Analytical solution for solute transport resulting from instantaneous injection in streams with transient storage". Journal of Hydrology.
- **Toman, Robert V. y Mueller, John A.** (1987). "Principles of surface water quality modeling and control".

- **Salazar, Carlos** (2003). “Situación de los recursos hídricos en Chile”. Centro del Tercer Mundo para el manejo d Agua A. C.
- **Fischer, Hugo B., List, E. John, Koh, Robert C.Y. y Brooks, Norman H.** (1979). “Mixing in inland and costal water”. Academic Press.

---

**ANEXO A**  
**EXPERIENCIAS EN LABORATORIO**

---

## A. EXPERIENCIAS EN LABORATORIO.

### A.1 Introducción.

Las experiencias descritas a continuación se realizaron con el objetivo de familiarizarse con el método de aforo químico con inyección instantánea de trazador, buscando validar las metodologías utilizadas al comparar los resultados obtenidos con los entregados a través de instrumentos externos.

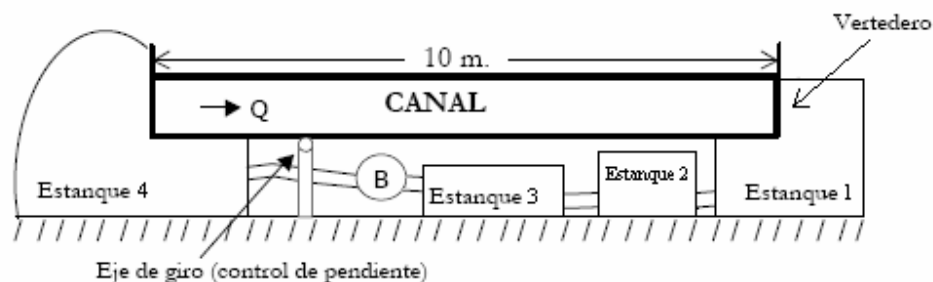
El principal objetivo al cual se apunta al realizar estas experiencias es la aplicación del método en terreno y en condiciones naturales. Para esto es de suma importancia la identificación de posibles problemas que se pueden presentar al realizar los aforos.

### A.2 Instrumentación.

#### A.2.1 Canal del laboratorio de fluidodinámica.

El canal disponible en el laboratorio de Fluidodinámica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile está hecho de paredes de vidrio, con una sección rectangular de 30 [cm] de ancho, aproximadamente 40 [cm] de alto máximo y 10 [m] de largo. El agua usada se encuentra almacenada en 4 estanques ubicados uno aguas arriba del canal, otro aguas abajo del canal y dos bajo éste, todos conectados con las tuberías apropiadas. El caudal que escurre por el sistema viene dado por una bomba de potencia variable, que se encuentra entre los estanques de almacenamiento 3 y 4, como se muestra en la Figura 1. El volumen máximo de almacenamiento de los estanques alcanza los 2450 [l] aproximadamente y el rango de caudales con los que se puede trabajar puede alcanzar un valor máximo aproximado de 8 [l/s].

**Figura A.1:**  
**Esquema del canal.**



Entre los accesorios con los que cuenta el canal se tiene:

- Un vertedero en el extremo aguas abajo del canal, el cual es de pared delgada y altura variable, con un máximo de 10 [cm] de alto.

- Una grada o vertedero de pared gruesa de 10 [cm] de alto y 50 [cm] de largo.
- Dos vertederos triangulares de ángulos internos 45° y 60°, respectivamente, donde el vértice se sitúa a 5 y 10 [cm] desde el fondo, respectivamente.
- Una compuerta de apertura variable, la cual cuenta con piezómetros a lo alto de ésta.
- Dos limnímetros montados sobre carros que se desplazan en la parte superior del canal, los cuales permiten medir las alturas de escurrimiento.
- Un tubo de Pitot tipo Prandtl, que permite determinar la altura de velocidad, es decir, estimar la velocidad en un punto particular del flujo mediante la diferencia de presión entre sus ramas.

Las mediciones del caudal se realizan con la diferencia de las presiones medidas con una placa orificio y utilizando la Ecuación A.1:

$$Q = 4,26 \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (\text{A.1})$$

donde:

Q: caudal en [l/s]

$\Delta p$ : diferencia de presión en [milibares]

## **A.2.2 Conductivímetros.**

### **A.2.2.1 Conductivímetro portátil Multi 340i.**

El conductivímetro portátil que fue utilizado para las experiencias viene incluido en el set de sensores del instrumento portátil de medición Multi 340i. Este instrumento tiene la capacidad de realizar las siguientes mediciones:

- PH y Redox.
- Medición del contenido de oxígeno disuelto en el agua.
- Medición de conductividad, salinidad y temperatura.

La célula conductímetra que utiliza este instrumento es la TetraCon 325, la cual, al ser utilizada con el instrumento Multi 340i puede entregar valores en los siguientes rangos y con los siguientes errores:

**Tabla A.1:  
Rango de medición y resolución del conductímetro.**

|   | Rango de medición |        | Resolución |
|---|-------------------|--------|------------|
|   | Mínimo            | Máximo |            |
| Conductividad [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | 0                 | 1999   | $\pm 1$    |
| Conductividad [ $\text{mS}/\text{cm}$ ]   | 0                 | 19,99  | $\pm 0,01$ |
|   | 0                 | 199,0  | $\pm 0,1$  |
|   | 0                 | 500    | $\pm 1$    |
| Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]        | -5,0              | 105,0  | $\pm 0,1$  |

**Tabla A.2:  
Error del conductímetro.**

|                                    | Error | T [ $^{\circ}\text{C}$ ] del medio a medir |        |
|------------------------------------|-------|--|--------|
|                                    |       | Mínimo                                     | Máximo |
| Conductividad                      | 0,5 % | 0  | 35     |
|                                    | 0,5 % | 35   | 50     |
| Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] | 0,1   |  |        |

Este aparato presenta varias ventajas en su utilización, tales como: evaluación automática del estado de la calibración, medición simultánea de la conductividad y la temperatura, almacenamiento en la memoria de las mediciones hechas, entre otras.

#### A.2.2.2 Conductímetro PASCO CI-6739A.

Este modelo de conductímetros PASCO funciona con la interfaz para computador PASCO *Science Workshop*, la cual permite mantener mediciones en línea durante un periodo de tiempo. Estos conductímetros pueden tener dos tipos de electrodos, uno de 1X y uno con una señal amplificada de 10X. Cada uno de ellos puede trabajar en ambientes cuyas temperaturas estén en el rango de 0 [ $^{\circ}\text{C}$ ] y 80 [ $^{\circ}\text{C}$ ]. La conductividad máxima que se puede medir se logra utilizando el electrodo 10X, logrando un valor de 200.000 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]. A continuación se muestran los rangos de medición y los errores asociados:

**Tabla A.3:  
Rango de medición y resolución del sensor 1X.**

|   | Rango de medición |        | Resolución |
|---|-------------------|--------|------------|
|   | Mínimo            | Máximo |            |
| Conductividad [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | 0                 | 20000  | $\pm 10$   |
|   | 0                 | 2000   | $\pm 1$    |
|   | 0                 | 200    | $\pm 0.1$  |



**Tabla A.4:  
Rango de medición y resolución del sensor 10X.**

|                                | Rango de medición |        | Resolución |
|--------------------------------|-------------------|--------|------------|
|                                | Mínimo            | Máximo |            |
| Conductividad<br>[ $\mu$ S/cm] | 0                 | 200000 | $\pm 100$  |
|                                | 0                 | 20000  | $\pm 10$   |
|                                | 0                 | 2000   | $\pm 1$    |

**Tabla A.5:  
Error del instrumento.**

|               | Error | Comentario          |
|---------------|-------|---------------------|
| Conductividad | 10,0% | sin calibración     |
|               | 1,0%  | después de calibrar |

Debido a problemas con estos instrumentos a la hora de realizar las experiencias no fue posible utilizarlos de forma más extendida. Su aplicación solo se realizó en una etapa muy preliminar de las experiencias en laboratorio. El conductímetro que se utilizó para las experiencias en laboratorio fue el que se describe a continuación.

#### **A.2.2.3 Conductímetro Schott LF5100.**

Este conductímetro funciona a través del módulo para computador CASSY Lab y permite medir valores de conductividad entre 0 [mS/cm] y 200 [mS/cm], funcionando con temperaturas entre  $-5$  [°C] y 80 [°C].

El módulo para computador CASSY Lab permite controlar distintos tipos de sensores según sea necesario, pudiendo obtenerse mediciones en línea de distintos parámetros. Entre las ventajas que presenta se destacan las siguientes: permite medir valores con distintas frecuencias, permite calibrar las mediciones, graficar los datos obtenidos, cambiar los rangos de medición de forma que los datos obtenidos tengan una precisión adecuada, entre otras.

#### **A.2.3 Balanza.**

Para las experiencias se utilizó la balanza KERN EW 1500-2M, la cual tiene un rango de medición entre 0,5 [gr] y 1500 [gr] con un error de  $\pm 0,01$  [gr].

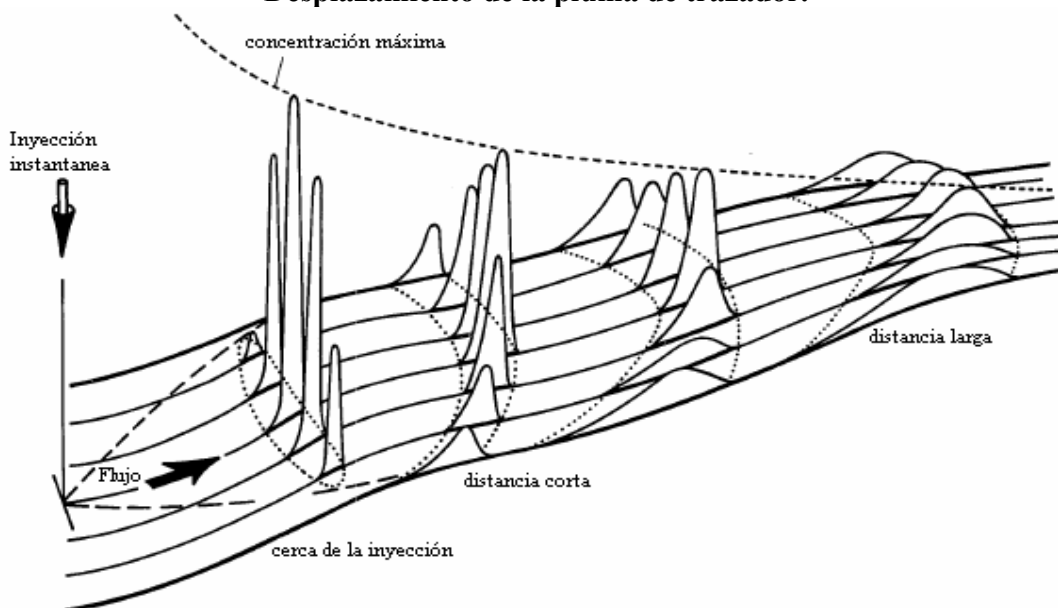
**Figura A.2:**  
**Balanza KERN EW 1500-2M.**



### A.3 Descripción Teórica.

El sistema de aforo utilizado para las experiencias descritas en este capítulo es el método de inyección instantánea. Este método consiste en inyectar una cantidad conocida de masa de trazador en el flujo de un cauce de manera instantánea y luego medir el paso de la nube de trazador a través del tiempo. Si se grafica la concentración de trazador medida en un punto del cauce versus el tiempo se puede obtener una curva conocida como curva de respuesta del trazador. En la Figura A.3 se pueden ver distintas curvas de respuesta que representan mediciones en distintos puntos a lo ancho y largo del cauce.

**Figura A.3:**  
**Desplazamiento de la pluma de trazador.**



Luego de la inyección de trazador, la nube comienza a viajar con el flujo dispersándose a lo ancho y largo de éste. Para distancias muy cortas entre el punto de inyección y el de medición la mezcla completa aun no ha sido alcanzada, por lo que las curvas medidas a lo ancho del cauce tendrían áreas distintas. A medida que nos alejamos del punto de inyección, la mezcla comienza a ser mayor, con lo que las áreas de las curvas comienzan a ser similares mientras que la forma de las curvas no necesariamente es la misma. Es importante destacar que el grado de mezcla completa esta asociada al área de la curva, mientras que la forma está asociada, entre otras cosas, a la velocidad del flujo y a la dispersión del trazador en el agua.

Para que los cálculos del caudal sean lo más exactos posible se debe contar con una buena caracterización del paso de la nube de trazador y con un correcto cálculo del área bajo la curva de respuesta. El caudal puede ser calculado a partir de la Ecuación A.2, la cual se deriva del principio de conservación de masa:

$$\Rightarrow Q = \frac{M}{\int (C - C_b) \cdot dt} \approx \frac{M}{\Delta t \cdot \sum (C_i - C_b)} \quad (\text{A.2})$$

donde:

Q: caudal del cauce.

M: masa de trazador inyectada en el flujo.

$C_b$ : concentración inicial del trazador en el agua.

$\int (C - C_b) \cdot dt$ : área bajo la curva de respuesta del trazador.

$C_i$ : concentración del trazador medida en el instante  $i$ .

$\Delta t$ : intervalo de tiempo entre cada medida de concentración de trazador en el agua.

Para las experiencias que se analizarán en este capítulo se utilizó el Cloruro de Sodio como trazador. La forma más común de medir la curva de respuesta de la sal en el cauce es a través del cambio en la conductividad eléctrica del agua a medida que la nube de trazador avanza con el flujo. Este aumento de la conductividad se mide con un conductivímetro y, por medio de una relación como la mostrada en la Ecuación A.3, se transforman los valores de conductividad a concentración de trazador:

$$\text{Concentración} = k \cdot \text{Conductividad} \quad (\text{A.3})$$

Para poder hacer esta transformación es necesario calcular el coeficiente  $k$ , el cual se obtiene de una curva de calibración, la cual se fabrica usando datos de conductividad medidos en distintas muestras con concentraciones conocidas.

Como los cambios de temperatura influyen en la medida de conductividad, es necesario hacer la transformación a concentración a una temperatura fija y transformar las medidas hechas a otras temperaturas de modo que todas sean comparables. Para poder transformar las medidas

de conductividad hechas a distintas temperaturas a una conductividad estándar de 20° C se utilizó la Ecuación A.4 (Olivares, 2000):

$$Cond_{20^{\circ}C} = Cond_{.T} \cdot [1 - b \cdot (T - 20)] \quad (A.4)$$

donde:

Cond: conductividad.

b: coeficiente de transformación que varía con la temperatura.

T: temperatura [°C].

El coeficiente b es función de la temperatura y debe ser obtenido de la Ecuación A.5 (Olivares, 2000):

$$b(T^{\circ}) = 0,0359 \cdot e^{(-0,0218 \cdot T^{\circ})} \quad (A.5)$$

Como resumen se puede escribir la Ecuación A.6, la cual permite pasar de valores de conductividad a concentración:

$$Cond_{20^{\circ}C} = Cond_{.T^{\circ}C} \cdot [1 - 0,0359 \cdot e^{-0,0218 \cdot T^{\circ}} \cdot (T - 20)] \quad (A.6)$$

Finalmente es recomendable que el punto de medición no presente una turbulencia importante, ya que el conductivímetro puede presentar problemas de medición cuando hay muchas burbujas de aire.

## **A.4 Experiencias en Laboratorio.**

### **A.4.1 Curva de calibración.**

Para poder obtener la concentración de Cloruro de Sodio en cada prueba fue necesario construir una relación que permita transformar los valores de conductividad obtenidos en concentración. Para esto se ideó una prueba en la cual se fabricaron 13 soluciones con concentraciones diferentes y conocidas. A cada una de estas soluciones se le midió la conductividad con dos conductivímetros distintos, de manera de tener una certeza mayor en cuanto a los resultados. Los instrumentos utilizados son: un conductivímetro del instrumento manual de medición universal Multi 340i y un conductivímetro Pasco CI-6739A.

Como el valor de la conductividad está relacionado con la temperatura del medio fue necesario hacer la calibración para una temperatura estándar. Para esto se transformaron los valores de conductividad a un valor equivalente a 20 [°C] usando la siguiente expresión descrita en el punto 3.

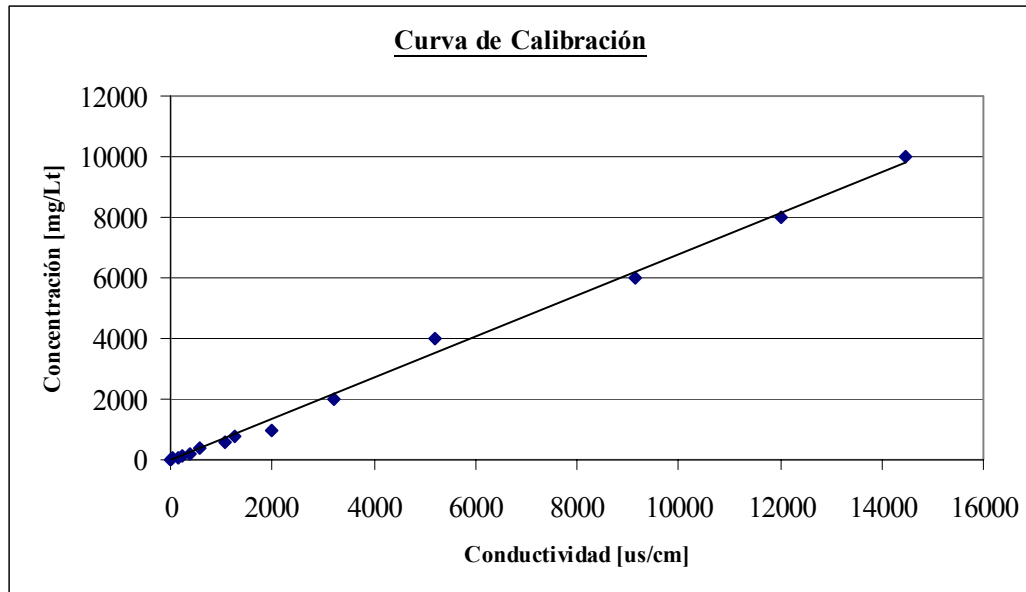
También se midió la conductividad base que presenta el agua sin Cloruro de Sodio, de manera de poder restar a cada una de las mediciones la conductividad base que no esta relacionada con el efecto de la Sal. Haciendo esta corrección se puede ver estrictamente la relación que presenta la conductividad medida y corregida por temperatura con la concentración conocida de Sal en la solución.

Una vez que la conductividad ha sido expresada en su equivalente a 20 [°C] y que ha sido restada la conductividad base fue posible construir un gráfico de concentración versus conductividad. Los resultados obtenidos para el conductivímetro Pasco CI-6739A se muestran en la Tabla A.6:

**Tabla A.6:  
Mediciones con conductivímetro Pasco CI-6739A.**

| Concentración [mg/l] | Conductividad Promedio [ $\mu\text{s/cm}$ ] | Temperatura [°C] | Conductividad a 20° C [ $\mu\text{s/cm}$ ] | Conductividad corregida a 20°C [ $\mu\text{s/cm}$ ] |
|----------------------|---|------------------|--|---|
| 0                    | 621   | 27,1             | 533,33                                     | 0,00  |
| 20                   | 675   | 27               | 580,84                                     | 47,51   |
| 80                   | 783   | 26,5             | 680,46                                     | 147,14  |
| 100                  | 872   | 26,5             | 757,81                                     | 224,48  |
| 200                  | 1059  | 27               | 911,27                                     | 377,95  |
| 400                  | 1280  | 26,7             | 1107,97                                    | 574,65  |
| 600                  | 1849  | 26,6             | 1603,68                                    | 1070,35   |
| 800                  | 2048  | 26,5             | 1779,81                                    | 1246,48   |
| 1000                 | 2885  | 26,4             | 2512,20                                    | 1978,88   |
| 2000                 | 4367  | 27,1             | 3750,46                                    | 3217,13   |
| 4000                 | 6665  | 27               | 5735,25                                    | 5201,92   |
| 6000                 | 11163                                       | 26,7             | 9662,75                                    | 9129,42   |
| 8000                 | 14481                                       | 26,7             | 12534,82                                   | 12001,50  |
| 10000                | 17352                                       | 26,8             | 14990,32                                   | 14457,00  |

**Figura A.4:**  
**Curva de calibración con conductímetro Pasco CI-6739A.**



En el gráfico anterior es posible notar que los puntos tienen una distribución lineal, con lo que, al hacer la regresión lineal, se obtuvo el siguiente resultado:

$$Conc. = 0,679 \cdot Cond.$$

$$R^2 = 0,9969$$

donde:

Conc: concentración de Cloruro de Sodio en [mg/l].

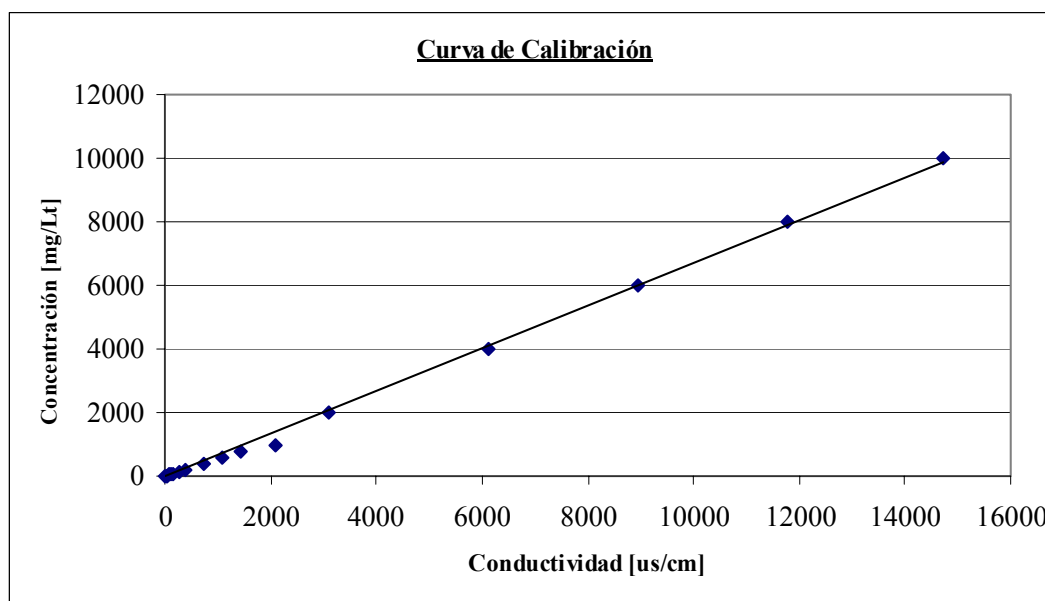
Cond: conductividad corregida de la solución en [ $\mu$ s/cm].

Los resultados obtenidos utilizando el conductímetro del instrumento multiparámetro Multi 430i se muestran en la Tabla A.7:

**Tabla A.7:**  
**Mediciones con conductímetro del instrumento Multi 340i.**

| Concentración [mg/l] | Promedio [ $\mu\text{s/cm}$ ] | Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Conductividad a 20 $^{\circ}\text{C}$ [ $\mu\text{s/cm}$ ] | Conductividad relativa [ $\mu\text{s/cm}$ ] |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|--|---|
| 0                    | 668                           | 27,1                               | 573,69   | 0,00  |
| 20                   | 720                           | 27                                 | 619,56   | 45,87                                       |
| 80                   | 824                           | 26,5                               | 716,10   | 142,40                                      |
| 100                  | 968                           | 26,5                               | 841,24   | 267,55                                      |
| 200                  | 1102                          | 27                                 | 948,27   | 374,58                                      |
| 400                  | 1515                          | 26,7                               | 1311,39  | 737,70                                      |
| 600                  | 1894                          | 26,6                               | 1642,71  | 1069,02                                     |
| 800                  | 2300                          | 26,5                               | 1998,81  | 1425,12                                     |
| 1000                 | 3040                          | 26,4                               | 2647,17  | 2073,48                                     |
| 2000                 | 4290                          | 27,1                               | 3684,33  | 3110,64                                     |
| 4000                 | 7780                          | 27                                 | 6694,71  | 6121,02                                     |
| 6000                 | 10980                         | 26,7                               | 9504,34  | 8930,65                                     |
| 8000                 | 14290                         | 26,7                               | 12369,49   | 11795,80                                    |
| 10000                | 17700                         | 26,8                               | 15290,96   | 14717,27                                    |

**Figura A.5:**  
**Curva de calibración con conductímetro del instrumento Multi 340i.**



Según los datos anteriores se obtiene la siguiente regresión lineal:

$$\text{Conc.} = 0,6724 \cdot \text{Cond.}$$

$$R^2 = 0,9984$$

donde:

Conc: concentración de Cloruro de Sodio en [mg/l].

Cond: conductividad corregida de la solución en [ $\mu\text{s/cm}$ ].

Como se puede notar, los dos conductivímetros entregaron valores similares para la curva de calibración y los dos tienen un coeficiente de correlación muy cercano a 1. Según esto podemos decir que los resultados obtenidos son confiables y pueden ser utilizados para las experiencias posteriores.

Se puede ver de los resultados anteriores que el conductivímetro usado no influye en el coeficiente de transformación obtenido. Según esto, conviene utilizar el coeficiente que logro representar con mayor fidelidad lo que sucedía en las mediciones, es decir, se utilizará el coeficiente 0,6724, el cual fue obtenido con el conductivímetro Multi 340i.

Como el agua utilizada en el laboratorio es agua potable de Santiago, se asumió que las características del agua en los experimentos no varían en gran medida, por lo que el coeficiente calculado puede ser utilizado en todas las experiencias a realizar.

#### **A.4.2 Verificación de la calibración de la placa orificio del canal.**

Para poder hacer los aforos con trazador en el canal es necesario que los caudales pasantes sean absolutamente conocidos, de manera de poder comparar estos caudales con los obtenidos a través de los aforos químicos. La medición de los caudales en el canal se hace con la diferencia de presiones registradas en una placa orificio y utilizando la Ecuación A.1.

Para poder verificar los caudales obtenidos con la placa orificio se utilizó un vertedero rectangular de pared delgada. Según lo descrito en el Capítulo 2, el caudal en este tipo de vertedero puede ser calculado con la Ecuación A.7. Es importante notar que en este caso, como es un vertedero rectangular de pared delgada, se utilizará un  $\mu=0,4$ , el cual considera una posible contracción lateral del flujo. Con este valor se está incorporando un posible efecto debido a la contracción lateral del agua en el vertedero:

$$Q = \mu \cdot l \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (\text{A.7})$$

donde:

Q: caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

$\mu$ : coeficiente relacionado al tipo de vertedero, a la forma en que el agua es vertida, entre otros factores.

l: ancho del vertedero, en este caso son 0,3 [m]

h: altura de agua sobre el vertedero [m].

g: gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

Para verificar el caudal en el canal, se midieron con la placa orificio varios caudales distintos y, para cada uno de ellos, se midió la carga de agua sobre el vertedero al final del canal, lo que permitió comparar los valores obtenidos con ambos métodos. Con esto se obtuvieron los resultados de la Tabla A.8 y A.9:



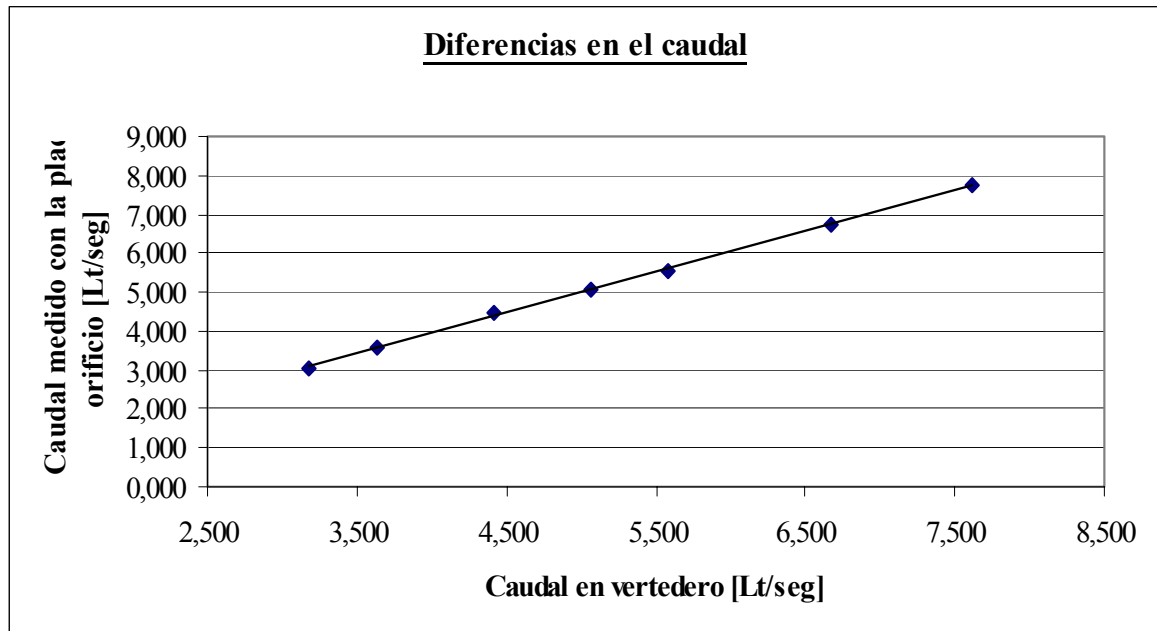
**Tabla A.8:**  
**Caudales obtenidos con la placa orificio.**

| n° | Presión 1 [mbar] | Presión 2 [mbar] | $\Delta p$ [mbar] | Caudal [l/s] |
|----|------------------|------------------|-------------------|--------------|
| 1  | 2,6              | 3,1              | 0,5               | 3,012        |
| 2  | 2,5              | 3,2              | 0,7               | 3,564        |
| 3  | 2,3              | 3,4              | 1,1               | 4,468        |
| 4  | 2,1              | 3,5              | 1,4               | 5,040        |
| 5  | 2                | 3,7              | 1,7               | 5,554        |
| 6  | 1,6              | 4,1              | 2,5               | 6,736        |
| 7  | 1,2              | 4,5              | 3,3               | 7,739        |

**Tabla A.9:**  
**Caudales obtenidos con el vertedero.**

| n° | Carga sobre el vertedero [m] | Caudal [l/s] |
|----|------------------------------|--------------|
| 1  | 0,033                        | 3,19         |
| 2  | 0,036                        | 3,63         |
| 3  | 0,041                        | 4,41         |
| 4  | 0,045                        | 5,07         |
| 5  | 0,048                        | 5,59         |
| 6  | 0,054                        | 6,67         |
| 7  | 0,059                        | 7,61         |

**Figura A.6:**  
**Comparación de caudales con placa orificio y vertedero.**



A partir de los resultados anteriores se hizo una regresión lineal, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\text{pendiente} = 1,0521$$

$$R^2 = 0,9989$$

Según los resultados anteriores, podemos ver que los puntos forman prácticamente una línea recta y que la pendiente es muy cercana a 1, por lo cual los valores son muy parecidos. Las posibles distorsiones se pueden deber a errores en el coeficiente  $\mu$  elegido o a incertezas en las mediciones de la carga sobre el vertedero. De cualquier forma se puede asegurar que la calibración para la medición de los caudales a través de la placa orificio es correcta.

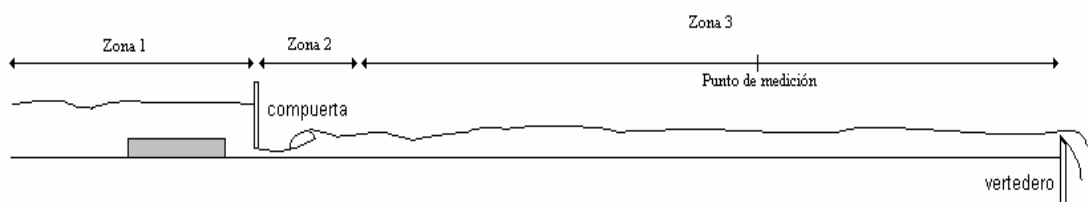
### A.4.3 Concentración medible en las experiencias.

Antes de poder hacer experiencias en las que se pueda medir el caudal en el canal a través de la caracterización de la pluma de solución inyectada, fue necesario ver como era la respuesta del conductivímetro a distintas concentraciones de Cloruro de Sodio en la solución trazadora, de manera de determinar la concentración limite a la cual el trazador comienza a ser detectable. Para esto se crearon varias soluciones trazadoras con diferentes cantidades de Cloruro de Sodio y se intentó detectar el paso de esta nube en el agua del canal.

La configuración utilizada en el canal se puede ver en la figura A.7. En ella se distinguen tres zonas distintas:

- Zona 1: esta zona va desde el comienzo del canal hasta la compuerta, la cual se ubica aproximadamente a 2 [m] del inicio. Aquí se forma un sector de aguas tranquilas y es donde es vertida la solución de trazador.
- Zona 2: en esta zona, de aproximadamente 1 [m] de largo, se impone un resalto de forma de favorecer la mezcla del trazador en el agua.
- Zona 3: es el sector del canal que es utilizado para las mediciones con el conductivímetro. En este caso las mediciones fueron hechas aproximadamente a 5 [m] de la compuerta.

**Figura A.7:**  
**Esquema del canal.**



Utilizando las condiciones de escurrimiento anteriores fue posible obtener los resultados que se muestran en la Tabla A.10:

**Tabla A.10:  
Concentración medible.**

| Concentración NaCl en la solución trazadora [mg/l] | Observación |
|--|-------------|
| 2000   | Nula        |
| 4000   | Nula        |
| 8000   | Nula        |
| 16000  | Incierta    |
| 32000  | Incierta    |
| 64000  | Positiva    |
| 96000  | Positiva    |
| 128000   | Positiva    |

donde:

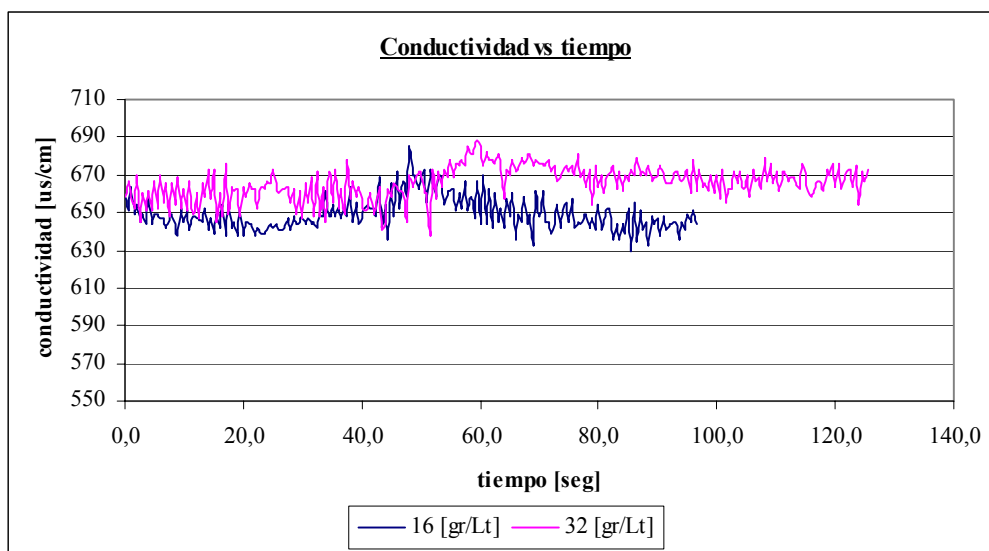
Nula: significa que no ha sido posible detectar el paso de la nube.

Incierta: existe un posible efecto del trazador, pero no es seguro que se trate del paso de la nube.

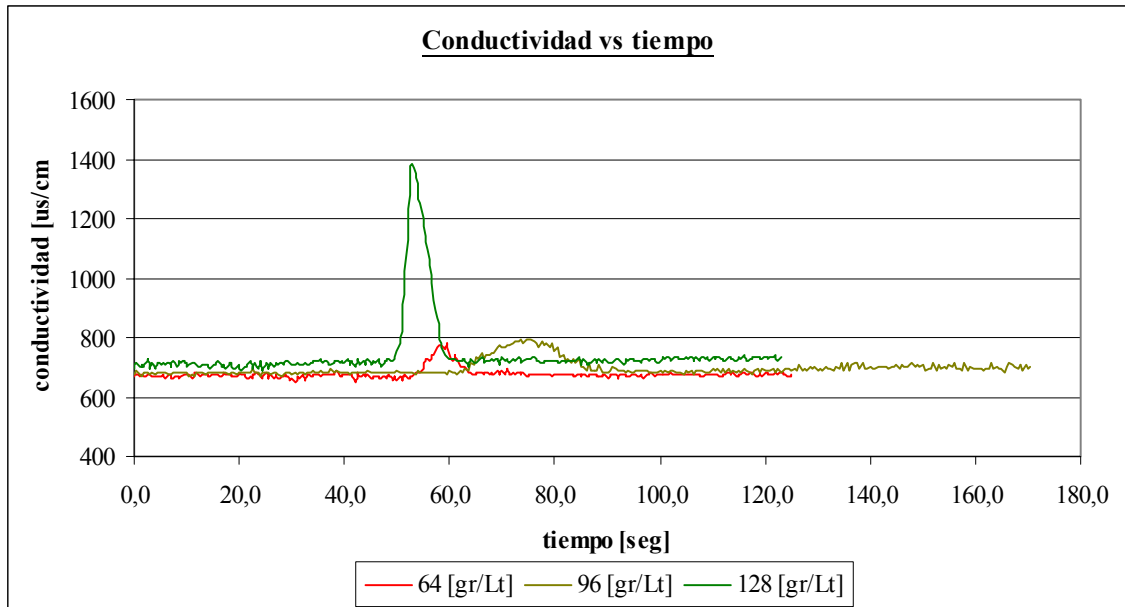
Positiva: se ve claramente el paso de la nube de trazador.

Los resultados de las pruebas anteriores se pueden ver en las Figuras A.8 y A.9. Las mediciones en las cuales no se notó ningún efecto debido a la inyección de Cloruro de Sodio no fueron consideradas en los gráficos.

**Figura A.8:  
Medición de conductividad con distintas concentraciones de sal.**



**Figura A.9:**  
**Medición de conductividad con distintas concentraciones de sal.**



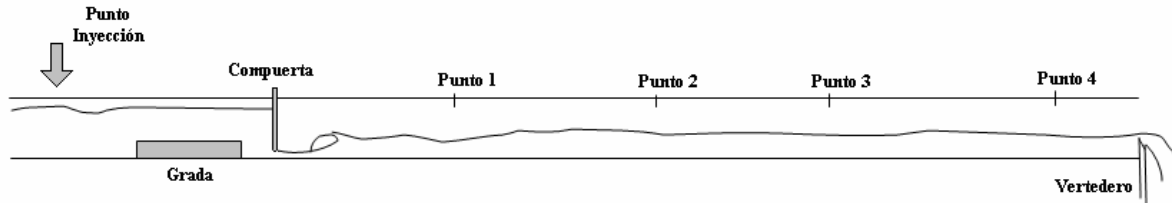
En los resultados anteriores es posible ver que a partir de los 64 [gr/l] de Cloruro de Sodio en la solución la nube de trazador puede ser detectada mientras pasa por el punto de medición. A pesar de lo anterior es importante notar que la forma de la curva de respuesta del trazador es bien definida cuando se usa una concentración de 128 [gr/l] o mayor, por lo que no resulta práctico utilizar concentraciones pequeñas de Cloruro de Sodio. Debido a lo anterior se tomó la decisión utilizar para las siguientes experiencias concentraciones cercanas al nivel de saturación, es decir, 200 [gr/l].

#### **A.4.4 Cálculo de caudales y variación del punto de medición.**

Esta experiencia tuvo como objetivo aplicar el método de aforo químico y analizar el efecto de alejar el punto de medición del punto de inyección, suponiendo que esto aumentaría el grado de mezcla del trazador en el agua. Se realizaron dos grupos de experiencias de inyección instantánea, las cuales usaban como trazador el Cloruro de Sodio. En ambos grupo de experiencias se inyectó 1 [l] de solución, siendo la concentración de trazador en el primer grupo de 150 [gr/l] mientras que en el segundo de 200 [gr/l]. El caudal fijado en el canal fue de 5,2 [l/s].

La conductividad generada por el trazador fue medida con un sensor Schott LF5100, el cual registra los datos en un computador a través del sistema CASSY Lab. La configuración del canal se hizo imponiendo un resalto de tal manera de aumentar la mezcla del trazador en el canal. En la Figura A.11 se puede ver un esquema del canal:

**Figura A.10:  
Condiciones de experimentación en el canal.**



**Tabla A.11:  
Características del escurrimiento.**

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,278                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 2,35 del comienzo del canal |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 3,1 del comienzo del canal  |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,092                       |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,048                       |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0,0152                      |

En cada grupo de experiencias se fijaron cuatro puntos de medición, en los cuales se utilizó un conductivímetro para registrar el paso de la nube de trazador en la parte central del canal. Para cada punto de medición se hicieron dos inyecciones instantáneas, cada una con una de las concentraciones de trazador antes nombradas. Los puntos de medición fijados fueron los siguientes:

- Punto 1: ubicado a 4,1 [m] del comienzo del canal.
- Punto 2: ubicado a 6,1 [m] del comienzo del canal.
- Punto 3: ubicado a 7,6 [m] del comienzo del canal.
- Punto 4: ubicado a 9,2 [m] del comienzo del canal.

En cada punto de medición el procedimiento utilizado fue el siguiente:

- Luego de verificar el funcionamiento del canal, se fijó el conductivímetro en el punto de medición, cuidando que esté ubicado correctamente en el centro del flujo.
- Se inyectó, aguas arriba de la compuerta, 1 [l] de solución con una de las concentraciones de trazador antes nombradas y se mide el paso de la nube de trazador con el conductivímetro. Es importante medir la temperatura en el momento del paso de la nube, ya que esto sirve para realizar la transformación de conductividad a concentración.
- Cuando la nube de trazador ha pasado completamente por el punto de medición es necesario esperar hasta que la conductividad se estabilice, ya que, al ser un canal de recirculación, el Cloruro de Sodio inyectado permanece disuelto en el agua del canal,

aumentando la conductividad base. Una vez que esta estabilización ha ocurrido se realiza otra inyección, esta vez utilizando la concentración de trazador restante.

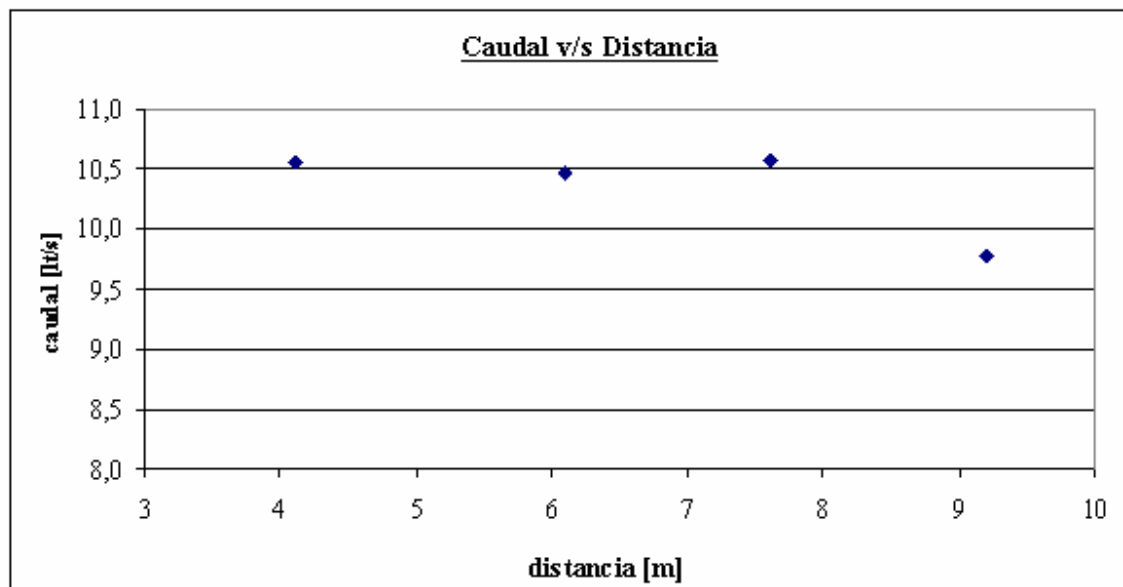
- Cuando las dos mediciones han sido hechas en un punto, se fijan los conductivímetros en el punto siguiente y se repite el procedimiento.

Los resultados del primer grupo de experiencias, es decir, de las mediciones hechas inyectando una masa de trazador de 150 [gr] disuelta en 1 [l] de agua, se pueden ver en la Tabla A.12:

**Tabla A.12:**  
**Resultados del primer grupo de experiencias.**

| Posición medición [m] | Área bajo curva de respuesta [mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-----------------------|---|--------------|
| 4,1                   | 14200,40                                | 10,56        |
| 6,1                   | 14329,02                                | 10,47        |
| 7,6                   | 14193,28                                | 10,57        |
| 9,2                   | 15352,15                                | 9,77         |
| <b>Promedio</b>       | 14518,71                                | 10,34        |
| <b>Desv. est.</b>     | 559,12                                  | 0,38         |
| <b>Error</b>          | 3,85%                                   | 3,71%        |

**Figura A.11:**  
**Caudal v/s Distancia Grupo 1.**

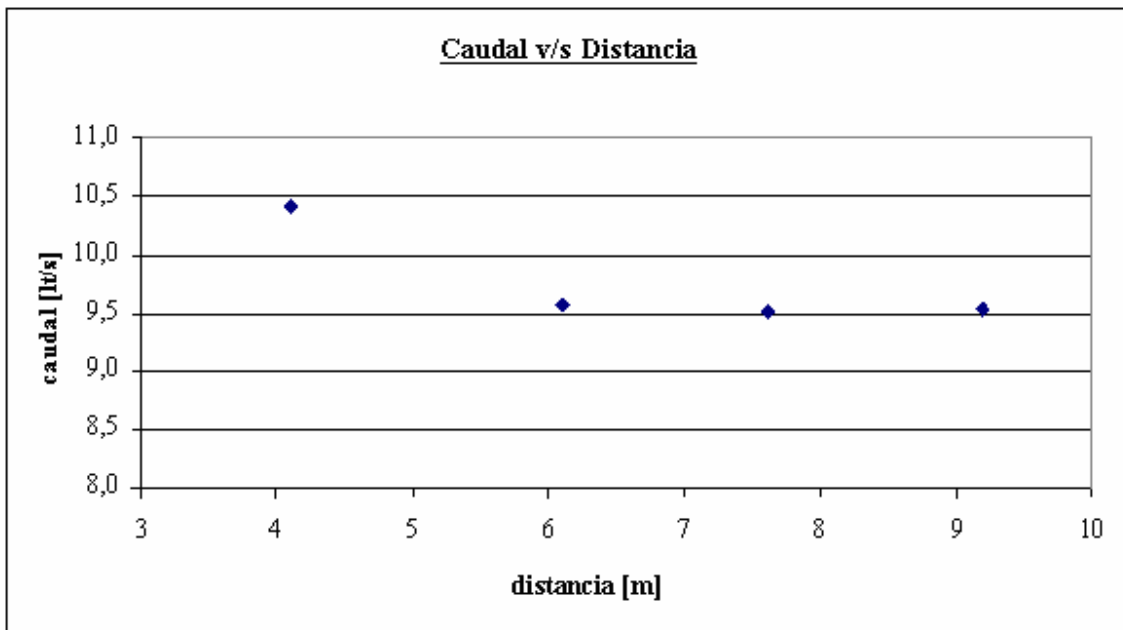


Los resultados del segundo grupo de experiencias se pueden ver en la Tabla A.13:

**Tabla A.13:**  
**Resultado del segundo grupo de experiencias.**

| Posición medición [m] | Área bajo curva de respuesta [mg · s/l] | Caudal [l/s] |
|-----------------------|---|--------------|
| 4,1                   | 19205,80                                | 10,41        |
| 6,1                   | 20880,15                                | 9,58         |
| 7,6                   | 21013,51                                | 9,52         |
| 9,2                   | 20976,86                                | 9,53         |
| <b>Promedio</b>       | 20519,08                                | 9,76         |
| <b>Desv. est.</b>     | 877,33                                  | 0,44         |
| <b>Error</b>          | 4,28%                                   | 4,46%        |

**Figura A.12:**  
**Caudal v/s Distancia Grupo 2.**



Es posible ver que, para una misma masa de trazador inyectada, no existe una diferencia importante entre los caudales medidos en los diferentes puntos a lo largo del canal. Los errores en los aforos son cercanos al 4%, lo que se puede asumir como un error propio del método.

También es posible notar que no existe una mejoría en el grado de mezcla del trazador en el agua del canal a medida que nos alejamos del punto de inyección. Lo anterior no permite concluir si existe un nivel de mezcla óptimo, ya que se pueden dar los siguientes casos:

- El largo del canal no es suficiente para poder notar un cambio real en el grado de mezcla a medida que nos alejamos del punto de inyección.
- El grado de mezcla es óptimo, por lo que al medir en puntos más alejados de la zona de inyección del trazador no se deberían obtener variaciones importantes en el valor del caudal aforado.

Se analizará la mezcla en el canal en las experiencias descritas a continuación, de forma de obtener datos adicionales que ayuden a plantear resultados concluyentes.

#### **A.4.5 Medición de las curvas de respuesta en el centro y en la zona lateral del canal.**

Para poder analizar el nivel de mezcla en el cauce, es posible analizar las curvas de respuesta del trazador en un punto de medición y en varios puntos a lo ancho del canal. Las diferencias que existen entre las áreas bajo las curvas en la zona central y lateral del flujo determinarán el nivel de mezcla que existe en el agua, ya que al obtenerse la mezcla perfecta estos valores tienden a ser iguales.

Según lo anterior se realizó una experiencia en la cual se hicieron, para cada punto de medición, series de inyecciones instantáneas de trazador a intervalos de tiempo conocidos y se midieron las curvas de respuesta del trazador. Los puntos de medición fueron dos: uno cercano y uno alejado del punto de inyección, de tal forma de poder analizar el cambio en la mezcla a lo largo del canal. Esta experiencia se realizó dos veces, donde la única diferencia entre ellas fue el caudal utilizado. En la primera experiencia se utilizó un caudal de 5 [l/s], mientras que en la segunda el caudal fue de 5,2 [l/s]. El objetivo de realizar dos experiencias similares fue poder verificar la metodología utilizada y los resultados obtenidos.

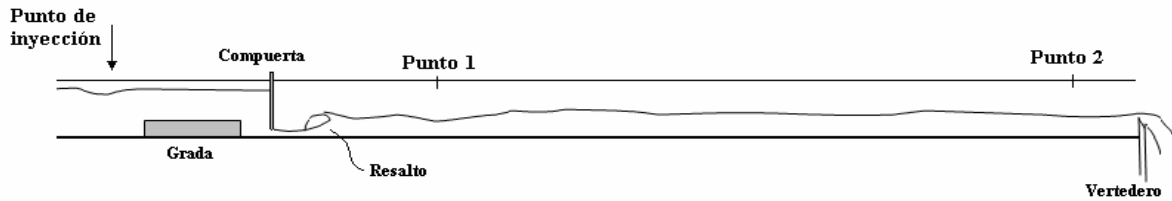
Para la medición de la conductividad en el agua del cauce se utilizaron dos sensores Schott LF5100, los cuales estaban conectados a un computador a través del sistema de adquisición de datos CASSY Lab. Los puntos de medición fijados fueron los siguientes:

- Punto 1: se ubica justo después del resalto, aproximadamente a 3.1 [m] del comienzo del canal.
- Punto 2: se ubica en la parte final del canal, es decir, a 6 [m] del punto de medición 1.

La configuración del canal para estas experiencias se puede ver en la Figura A.13:



**Figura A.13:  
Condiciones de experimentación del canal.**



**Tabla A.14:  
Características del escurrimiento.**

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,28                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 1,8 del comienzo del canal |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 2,3 del comienzo del canal |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,095                      |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,04                       |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0                          |

En cada punto de medición se hicieron dos mediciones de la curva de respuesta del trazador, una en la parte central del flujo y una en una zona lateral. El objetivo de esto fue poder comparar la diferencia en las áreas bajo la curva de respuesta del trazador a lo ancho del canal y, por lo tanto, comparar la diferencia en el valor de los caudales estimados con este método. Esto entrega una estimación del grado de mezcla que se está obteniendo en el canal.

En todas las experiencias, las inyecciones instantáneas se realizaron utilizando Cloruro de Sodio como trazador, donde el volumen inyectado fue de 1 [l] y la concentración de 200 [gr/l]. El procedimiento para cada serie de inyecciones y mediciones fue el siguiente:

- Primero se fijaron los dos sensores en la sección transversal del cauce en la cual se harán las mediciones. Uno de los sensores se ubica en el centro del cauce mientras que el otro se ubica a 3 [cm] de uno de los bordes.
- Luego de verificar que los instrumentos funcionaran correctamente se comenzó con la toma de datos, de forma de fijar una situación base de la conductividad en el agua del canal antes de las inyecciones de trazador. Simultáneamente a esto se preparó la primera solución a inyectar.
- Se procedió con la inyección instantánea de trazador y se anotó el instante de tiempo en el cual fue hecha.
- Una vez que la nube de trazador alcanza el punto en el cual se encuentran los sensores, se midió la temperatura del agua, lo cual es necesario para la transformación posterior de la conductividad a concentración.

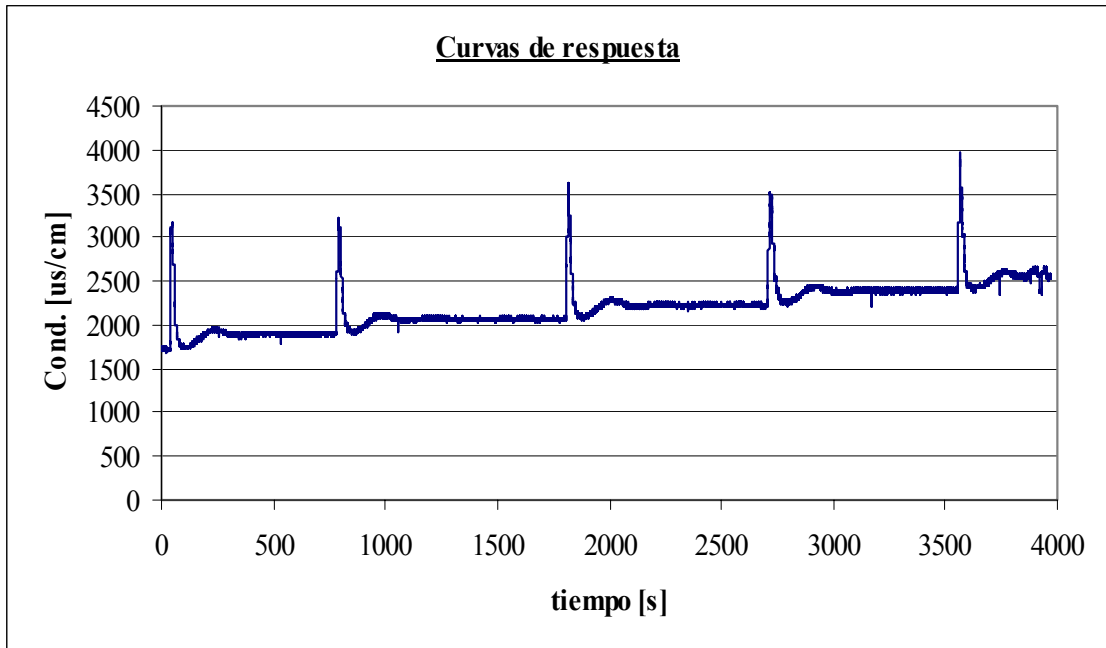
- Se esperó cierto tiempo de forma que la nube de trazador pase completamente por la sección de control. Mientras que esto sucede se prepara la solución siguiente que será inyectada.
- Cuando la nube pasa completamente por el punto de medición, se deja que el sistema vuelva a encontrar una concentración de equilibrio y se establece nuevamente una línea base de la conductividad en el agua del canal. Luego, se procedió con la siguiente inyección instantánea, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente. El procedimiento se repite cinco veces para cada punto de medición, anotando el instante de tiempo de la inyección y la temperatura del medio en el momento de la medición.

Para la presentación de los resultados cada una de las experiencias realizadas serán nombradas como se muestra a continuación:

- Experiencia 1-1: medición hecha con un caudal de 5 [l/s] en el Punto 1.
- Experiencia 1-2: medición hecha con 5 [l/s] en el Punto 2.
- Experiencia 2-1: medición hecha con 5,2 [l/s] en el Punto 1.
- Experiencia 2-2: medición hecha con 5,2 [l/s] en el Punto 2.

Según el procedimiento anterior se pudo obtener una serie de datos, con los cuales se pudo calcular un valor del área bajo la curva de respuesta del trazador y su caudal asociado para cada inyección y puntos de medición. Las mediciones de conductividad hechas para cada grupo de experiencias se pueden ver en las Figuras A.14 a A.17, mientras que los resultados obtenidos se muestran en la Tabla A.15 a A.18:

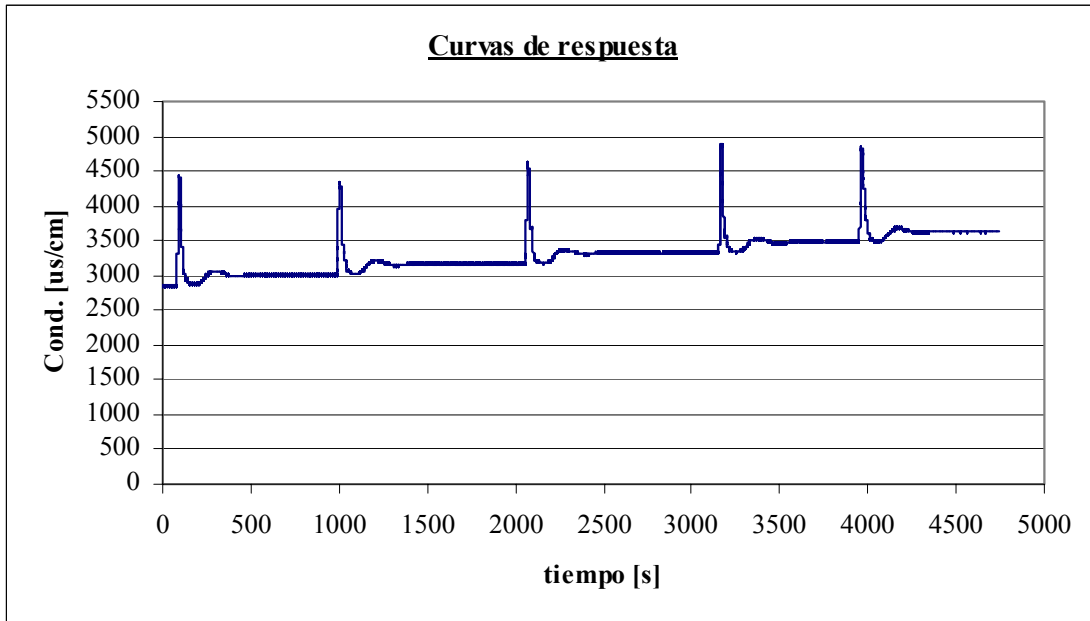
**Figura A.14:**  
**Mediciones de la experiencia 1-1.**



**Tabla A.15:**  
**Resultados de la experiencia 1-1.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [ $\text{mg} \cdot \text{s}/\text{l}$ ] |         | Caudal [ $\text{l}/\text{s}$ ] |         |
|-------------------|--|---------|--------------------------------|---------|
|                   | central  | lateral | central                        | lateral |
| 1                 | 22568,4  | 19547,9 | 8,86                           | 10,23   |
| 2                 | 24178,2  | 20128,4 | 8,27                           | 9,94    |
| 3                 | 22221,6  | 19972,9 | 9,00                           | 10,01   |
| 4                 | 23030,6  | 20578,7 | 8,68                           | 9,72    |
| 5                 | 22232,8  | 20527,3 | 9,00                           | 9,74    |
| <b>Promedio</b>   | 22846,3  | 20151,0 | 8,76                           | 9,93    |
| <b>Desv. est.</b> | 814,2  | 424,4   | 0,30                           | 0,21    |
| <b>Error</b>      | 3,56%  | 2,11%   | 3,46%                          | 2,12%   |

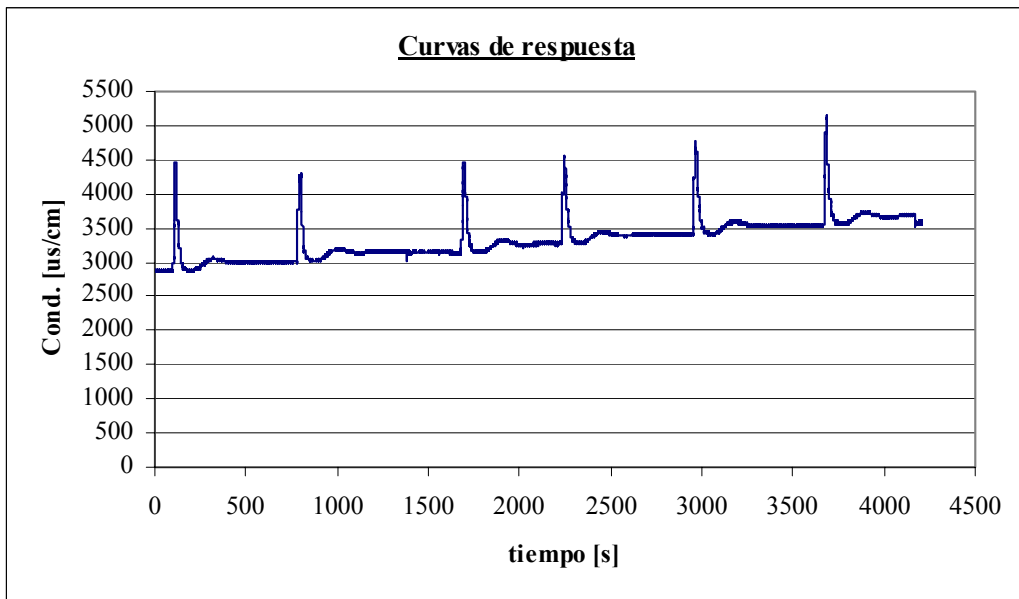
**Figura A.15:  
Mediciones de la experiencia 1-2.**



**Tabla A.16:  
Resultados de la experiencia 1-2.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s / l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                   | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 25305,9                                   | 22312,7 | 7,90         | 8,96    |
| 2                 | 25756,2                                   | 22453,4 | 7,77         | 8,91    |
| 3                 | 25735,4                                   | 21765,5 | 7,77         | 9,19    |
| 4                 | 26639,6                                   | 22692,9 | 7,51         | 8,81    |
| 5                 | 26154,9                                   | 23723,1 | 7,65         | 8,43    |
| <b>Promedio</b>   | 25918,4                                   | 22589,5 | 7,72         | 8,86    |
| <b>Desv. est.</b> | 502,7                                     | 719,4   | 0,15         | 0,28    |
| <b>Error</b>      | 1,94%                                     | 3,18%   | 1,93%        | 3,13%   |

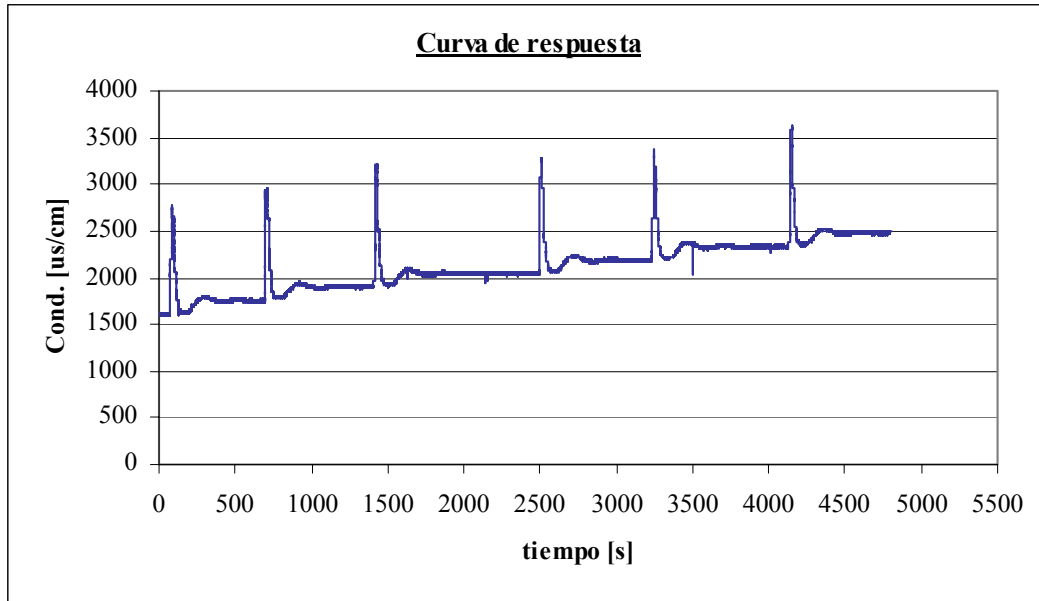
**Figura A.16:**  
**Mediciones de la experiencia 2-1.**



**Tabla A.17:**  
**Resultados de la experiencia 2-1.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 23840,4                                 | 19134,6 | 8,39         | 10,45   |
| 2                 | 23279,4                                 | 18226,3 | 8,59         | 10,97   |
| 3                 | 24152,6                                 | 18310,2 | 8,28         | 10,92   |
| 4                 | 23683,1                                 | 18498,9 | 8,45         | 10,81   |
| 5                 | 24600,5                                 | 19263,3 | 8,13         | 10,38   |
| 6                 | 25409,1                                 | 19778,8 | 7,87         | 10,11   |
| <b>Promedio</b>   | 24160,8                                 | 18868,7 | 8,29         | 10,61   |
| <b>Desv. est.</b> | 756,2                                   | 619,0   | 0,26         | 0,35    |
| <b>Error</b>      | 3,13%                                   | 3,28%   | 3,08%        | 3,25%   |

**Figura A.17:**  
**Mediciones de la experiencia 2-2.**



**Tabla A.18:**  
**Resultados de la experiencia 2-2.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s / l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                   | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 23007,5                                   | 16656,6 | 8,693        | 12,007  |
| 2                 | 23410,8                                   | 18338,7 | 8,543        | 10,906  |
| 3                 | 24318,4                                   | 18368,5 | 8,224        | 10,888  |
| 4                 | 24199,0                                   | 19149,1 | 8,265        | 10,444  |
| 5                 | 22823,1                                   | 18349,4 | 8,763        | 10,900  |
| 6                 | 23902,9                                   | 19586,0 | 8,367        | 10,211  |
| <b>Promedio</b>   | 23610,3                                   | 18408,1 | 8,476        | 10,893  |
| <b>Desv. est.</b> | 625,5                                     | 1001,4  | 0,225        | 0,618   |
| <b>Error</b>      | 2,65%                                     | 5,44%   | 2,66%        | 5,67%   |

Se puede ver en las tablas anteriores que las áreas bajo las curvas de respuesta del trazador son menores en la zona lateral del canal y mayores en el centro de este. Esto se produce por una falta de mezcla del trazador en el flujo, concentrándose una mayor cantidad de Cloruro de Sodio en la parte central del canal. Si existiera mezcla completa del trazador en el agua se debería obtener la misma área bajo la curva de respuesta en toda la sección de escurrimiento y, por lo tanto, el mismo caudal en la zona lateral y central del canal.

También se puede notar que no existe una tendencia clara en la cual exista una mejor mezcla del trazador a medida que nos alejamos del punto de inyección, como se esperaría. Sin

embargo es posible observar que el resalto ha producido una mezcla importante del trazador, haciendo que la diferencia entre las áreas medidas en la zona lateral y central del canal se encuentre entre el 10% y 25% del promedio entre ambas (ver Tabla A.19). La falta de mezcla puede deberse a que el largo del canal no es suficiente como para que los procesos de difusión ocurran totalmente en el ancho de la sección, por lo que la mezcla completa solo se alcanzaría si el largo del canal fuera mayor.

**Tabla A.19:**  
**Resumen de los promedios de las áreas bajo la curva de respuesta.**

| Experiencia | Área bajo curva de respuesta<br>[mg · s/l] |         | Diferencia | Diferencia [%] |
|-------------|--|---------|------------|----------------|
|             | central                                    | lateral |            |                |
| 1-1         | 22846,3                                    | 20151,0 | 2695,3     | 12,54%         |
| 1-2         | 25918,4                                    | 22589,5 | 3328,9     | 13,73%         |
| 2-1         | 24160,8                                    | 18868,7 | 5292,2     | 24,60%         |
| 2-2         | 23610,3                                    | 18408,1 | 5202,2     | 24,76%         |

Es importante notar que los caudales obtenidos nuevamente son distintos a los medidos con la placa orificio del canal, siendo mayores los caudales estimados con el método de inyecciones instantáneas. Esto puede verse en los resultados mostrados en la Tabla A.20:

**Tabla A.20:**  
**Resumen de los caudales promedio para cada experiencia.**

| Experiencia | Caudal [l/s] |         |            |
|-------------|--------------|---------|------------|
|             | central      | lateral | diferencia |
| 1-1         | 8,76         | 9,93    | 1,17       |
| 1-2         | 7,72         | 8,86    | 1,14       |
| 2-1         | 8,28         | 10,61   | 2,32       |
| 2-2         | 8,48         | 10,89   | 2,42       |

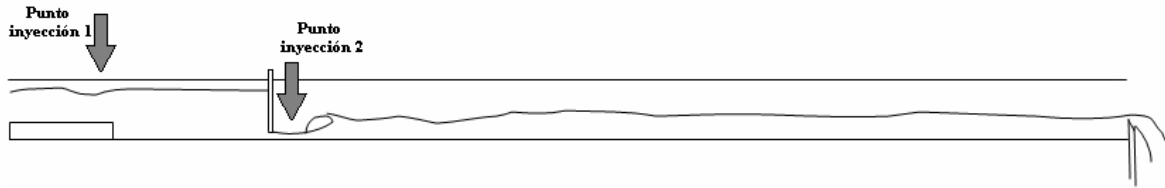
#### **A.4.6 Análisis del cambio del punto de inyección.**

Esta experiencia tuvo por objetivo analizar el cambio del punto de inyección en el canal, de forma de ver si existen diferencias importantes en los resultados obtenidos o cambios significativos en el grado de mezcla alcanzado en el flujo. Para esto se fijaron condiciones de escurrimiento similar a las utilizadas en la experiencia anterior.

Se hicieron dos grupos de experiencias, en las cuales se utilizó un caudal pasante de 7,1 [l/s] y como trazador el Cloruro de Sodio, donde el volumen inyectado es de 1 [l] y la concentración de 200 [gr/l]. El primer grupo de mediciones se hizo usando un punto de inyección de trazador aguas arriba de la compuerta, a 0,7 [m] del comienzo del canal, mientras que el otro grupo de mediciones tuvo como lugar de inyección un punto aguas abajo de la compuerta y antes del resalto, aproximadamente a 1,8 [m] del inicio del canal. La principal diferencia entre estos puntos de inyección es el régimen de escurrimiento en el cual es inyectado el trazador, ya que antes de la compuerta el agua está con una altura mayor a la altura crítica, lo

que implica velocidades más bajas y una menor turbulencia, mientras que aguas abajo de la compuerta y antes del resalto se tiene una altura de agua menor a la crítica, con lo cual las velocidades son mayores. Al hacer la inyección en dos puntos con regímenes de escurrimiento diferentes se pudo analizar las diferencias de mezcla entre ellos. Los puntos de inyección de trazador pueden ser vistos en la Figura A.18:

**Figura A.18:**  
**Puntos de inyección de trazador en el canal.**



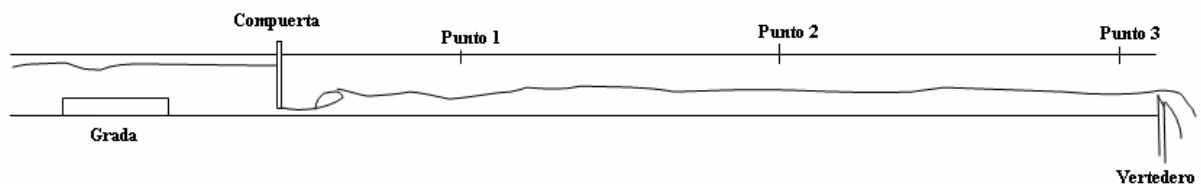
Para cada punto de inyección se definieron tres puntos de medición después del resalto:

- Punto 1: ubicado a 3,5 [m] del comienzo del canal.
- Punto 2: ubicado a 3 [m] después del punto 1, a 6,5 [m] del inicio del canal.
- Punto 3: ubicado a 6 [m] del punto 1, a 9,5 [m] del comienzo del canal.

En cada uno de estos puntos se hicieron mediciones de la nube de trazador en la parte central y lateral del flujo. La conductividad fue medida utilizando dos conductivímetros Schott LF5100, los cuales estaban conectados a un computador a través del sistema de adquisición de datos CASSY Lab.

La configuración del canal se presenta en la Figura A.19:

**Figura A.19:**  
**Esquema del canal.**





**Tabla A.21:  
Características del escurrimiento.**

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>h aguas arriba de la compuerta [m]</b> | 0,285                       |
| <b>posición compuerta [m]</b>             | 1,57 del comienzo del canal |
| <b>abertura compuerta [cm]</b>            | 2,3                         |
| <b>posición resalto [m]</b>               | 2,4 del comienzo del canal  |
| <b>h aguas abajo del resalto [m]</b>      | 0,103                       |
| <b>h vertedero [m]</b>                    | 0,04                        |
| <b>pendiente [m/m]</b>                    | 0                           |

El procedimiento seguido es análogo para cada grupo de mediciones, es decir, para el conjunto de mediciones hechas en cada uno de los distintos puntos de inyección. El procedimiento se presenta a continuación:

- Se fijaron los dos sensores en el primer punto de medición, instalando un sensor en la zona central del flujo, mientras que el otro se ubicó en una zona lateral del flujo, a 3 [cm] de uno de los bordes.
- Luego se comenzó con la toma de datos, de forma de medir la conductividad base en el agua del canal. Además se preparó la primera solución a inyectar.
- Una vez que se estableció la conductividad base, se procedió con la inyección instantánea de la solución trazadora y se anotó el instante de tiempo en el cual fue hecha.
- Se midió la temperatura del agua en el momento en que la nube de trazador pasa por el punto de medición, lo cual es necesario para la transformación de conductividad a concentración.
- Luego de que la nube de trazador ha pasado completamente por la sección de control, es necesario esperar un tiempo hasta que la concertación de trazador se estabilice nuevamente, ya que el canal utilizado es de recirculación. Una vez que se haya producido esta estabilización, se midió nuevamente una línea base de la conductividad en el agua del canal.
- La siguiente inyección se debe hacer luego de la estabilización de la conductividad, de forma que las mediciones posteriores no se vean influenciadas. El procedimiento se repite cuatro o cinco veces para cada punto de medición, anotando el instante de tiempo de la inyección y la temperatura del medio en el momento de la medición.

Según lo anterior los resultados obtenidos para el primer grupo de mediciones, es decir, para las mediciones hechas con la inyección de trazador aguas arriba de la compuerta, se muestran en las Tablas A.22 a A.24:

**Tabla A.22:**  
**Resultados para punto 1 con inyección aguas arriba de la compuerta.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 16919,6                                 | 12288,3 | 11,82        | 16,28   |
| 2                 | 15995,9                                 | 12551,3 | 12,50        | 15,94   |
| 3                 | 15963,6                                 | 12998,4 | 12,53        | 15,39   |
| 4                 | 17115,3                                 | 12768,3 | 11,69        | 15,66   |
| <b>Promedio</b>   | 16498,6                                 | 12651,6 | 12,1         | 15,8    |
| <b>Desv. est.</b> | 604,5                                   | 303,3   | 0,4          | 0,4     |
| <b>Error</b>      | 3,66%                                   | 2,40%   | 3,66%        | 2,40%   |

**Tabla A.23:**  
**Resultados para punto 2 con inyección aguas arriba de la compuerta.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 15439,1                                 | 15189,9 | 12,95        | 13,17   |
| 2                 | 16139,1                                 | 15344,8 | 12,39        | 13,03   |
| 3                 | 15872,0                                 | 16709,8 | 12,60        | 11,97   |
| 4                 | 16289,9                                 | 15461,1 | 12,28        | 12,94   |
| 5                 | 16283,0                                 | 16230,7 | 12,28        | 12,32   |
| <b>Promedio</b>   | 15935,0                                 | 15676,4 | 12,56        | 12,78   |
| <b>Desv. est.</b> | 373,1                                   | 697,8   | 0,30         | 0,55    |
| <b>Error</b>      | 2,34%                                   | 4,45%   | 2,37%        | 4,28%   |

**Tabla A.24:**  
**Resultados para punto 3 con inyección aguas arriba de la compuerta.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/l] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 18151,2                                 | 14038,3 | 11,02        | 14,25   |
| 2                 | 17832,0                                 | 14230,3 | 11,22        | 14,06   |
| 3                 | 19035,7                                 | 15137,6 | 10,51        | 13,21   |
| 4                 | 18426,1                                 | 15598,5 | 10,85        | 12,82   |
| 5                 | 18517,2                                 | 15453,6 | 10,80        | 12,94   |
| <b>Promedio</b>   | 18361,2                                 | 14751,2 | 10,90        | 13,58   |
| <b>Desv. est.</b> | 511,0                                   | 740,9   | 0,30         | 0,68    |
| <b>Error</b>      | 2,78%                                   | 5,02%   | 2,76%        | 4,99%   |

Los resultados obtenidos para el segundo grupo de mediciones, es decir, al inyectar el trazador aguas abajo de la compuerta, se muestran en las Tablas A.25 a A27:

**Tabla A.25:**  
**Resultados para punto 1 con inyección aguas abajo de la compuerta.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/1] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 15557,1                                 | 16274,0 | 12,86        | 12,29   |
| 2                 | 18516,4                                 | 14679,8 | 10,80        | 13,62   |
| 3                 | 16925,6                                 | 17622,3 | 11,82        | 11,35   |
| 4                 | 16335,0                                 | 15408,7 | 12,24        | 12,98   |
| <b>Promedio</b>   | 16833,5                                 | 15996,2 | 11,9         | 12,6    |
| <b>Desv. est.</b> | 1254,1                                  | 1264,8  | 0,9          | 1,0     |
| <b>Error</b>      | 7,45%                                   | 7,91%   | 7,25%        | 7,76%   |

**Tabla A.26:**  
**Resultados para punto 2 con inyección aguas abajo de la compuerta.**

| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/1] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 13630,1                                 | 13924,1 | 14,67        | 14,36   |
| 2                 | 15019,4                                 | 13819,7 | 13,32        | 14,47   |
| 3                 | 16532,9                                 | 14641,0 | 12,10        | 13,66   |
| 4                 | 15966,4                                 | 13418,5 | 12,53        | 14,91   |
| <b>Promedio</b>   | 15287,2                                 | 13950,8 | 13,15        | 14,35   |
| <b>Desv. est.</b> | 1269,0                                  | 509,1   | 1,1          | 0,5     |
| <b>Error</b>      | 8,30%                                   | 3,65%   | 8,61%        | 3,60%   |

**Tabla A.27:**  
**Resultados para punto 3 con inyección aguas abajo de la compuerta.**

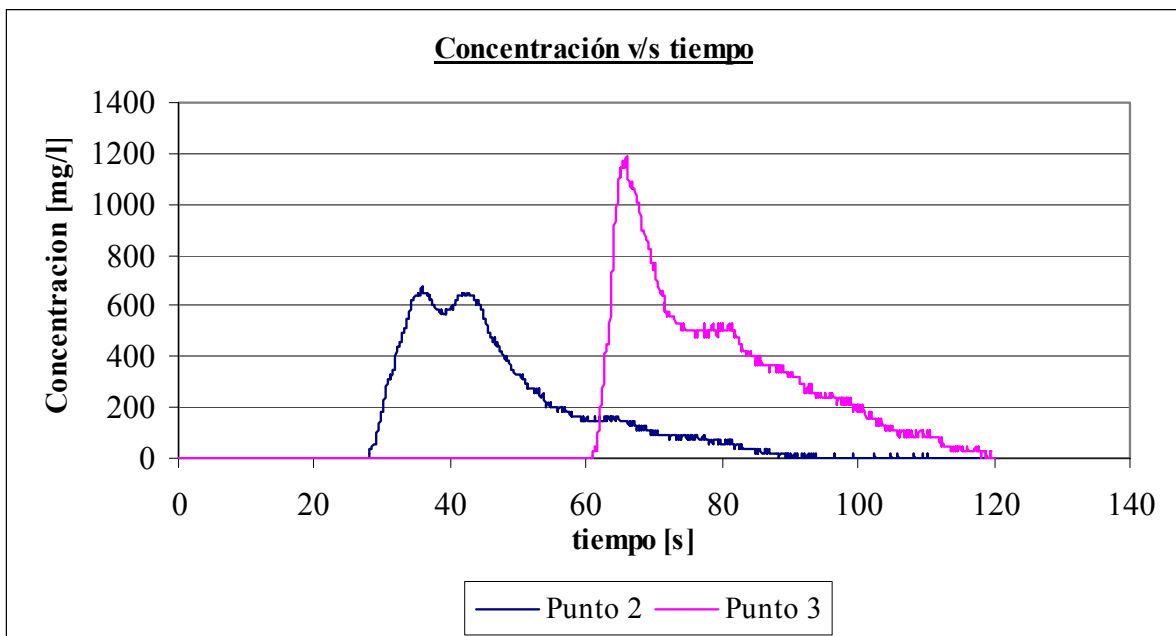
| n°                | Área bajo curva de respuesta [mg · s/1] |         | Caudal [l/s] |         |
|-------------------|---|---------|--------------|---------|
|                   | central                                 | lateral | central      | lateral |
| 1                 | 15704,1                                 | 14454,0 | 12,74        | 13,84   |
| 2                 | 13469,4                                 | 13720,8 | 14,85        | 14,58   |
| 3                 | 14555,2                                 | 14915,7 | 13,74        | 13,41   |
| 4                 | 14461,1                                 | 13926,8 | 13,83        | 14,36   |
| 5                 | 13352,0                                 | 14625,9 | 14,98        | 13,67   |
| <b>Promedio</b>   | 14547,4                                 | 14254,3 | 13,79        | 14,05   |
| <b>Desv. est.</b> | 914,2                                   | 538,3   | 0,86         | 0,53    |
| <b>Error</b>      | 6,28%                                   | 3,78%   | 6,26%        | 3,75%   |

En los resultados de las experiencias es posible ver que los caudales obtenidos con el aforo químico no cambian en gran medida al cambiar el punto de inyección, los cuales se mantienen entorno a un valor entre 10 [l/s] y 12 [l/s], el cual sigue siendo diferente al que se obtiene usando la placa orificio del canal.

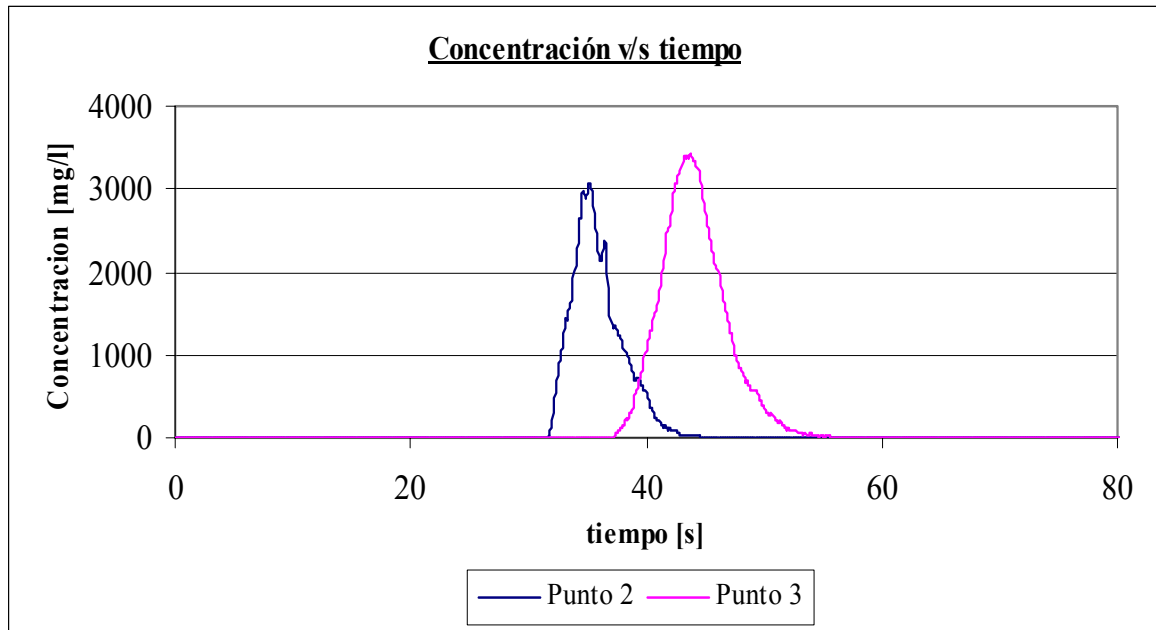
También es posible notar que, salvo en algunos casos, sigue existiendo una diferencia entre el área bajo la curva de respuesta en la zona central y lateral del flujo. Las diferencias se siguen manteniendo dentro de los rangos estimados en experiencias anteriores.

Es posible notar que al inyectar la solución trazadora aguas abajo de la compuerta y antes del resalto se obtienen curvas de respuesta más definidas y compactas. Al ser vertida la solución trazadora en una zona en que el escurrimiento ocurre en forma de río sucede que parte de la nube viaja aguas arriba del punto de inyección, lo que hace que la nube se alargue y sea necesario más tiempo para la medición. Por otro lado al verter la solución en una zona de torrente se obliga al trazador a viajar aguas abajo del punto de inyección, por lo que no existe una dispersión inicial importante, produciéndose curvas más compactas. A modo de ejemplo se presenta la comparación de las siguientes curvas:

**Figura A.20:**  
**Curvas medidas con inyección aguas arriba de la compuerta.**



**Figura A.21:**  
**Curvas medidas con inyección aguas abajo de la compuerta.**



#### **A.5 Análisis de resultados y conclusiones preliminares.**

A partir de los resultados de los experimentos realizados y descritos anteriormente se pueden hacer los siguientes comentarios preliminares:

- Los caudales obtenidos a través del método de aforo químico no son similares a los obtenidos con la placa orificio. Al analizar los caudales obtenidos con el método de aforo químico se puede ver que, al hacer inyecciones en serie, se obtienen caudales muy similares. Esto permite suponer que la diferencia con la placa orificio puede deberse a problemas sistemáticos, ya sea de cálculo o de los instrumentos.
- A pesar de que el nivel de mezcla en el canal es importante, se comprobó que no existe una mezcla completa en el canal. Se necesitaría aumentar el largo del canal o imponer otro tipo de control hidráulico para mejorarla.
- En una experiencia en laboratorio se comprobaron los valores entregados por la placa orificio. Además se pudo descartar como factor de error los problemas de cálculo, la mezcla y los posibles problemas con los conductivímetros. Se identificó como posible causa de esta diferencia un problema en el sistema de adquisición de datos, el cual podría tener un error en la escala de tiempo en el cual se hacen las mediciones.
- Las mediciones de la curva de respuesta del trazador se facilitan cuando la inyección se hace en una zona de escurrimiento de torrente, ya que se obtienen nubes más compactas y definidas. Las inyecciones en zonas de escurrimiento de río generan nubes con colas alargadas y menos concentradas en torno al centro de masas.

---

**ANEXO B**  
**DATOS DE AFOROS QUÍMICOS EN TERRENO**

---

## B. DATOS DE AFOROS QUÍMICOS EN TERRENO

A continuación se presentan los datos obtenidos en los aforos químicos realizados para las experiencias en terreno, las cuales se realizaron en un canal efluente del canal Las Mercedes. Se presentarán a continuación las conductividades medidas en terreno, así como las concentraciones calculadas. También se presentarán las áreas bajo las curvas de respuesta y los caudales estimados. Los datos se diferencian según el día en que se hicieron las mediciones.

**Tabla B.1:  
Aforo químico en el Punto 1 (7-febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0          | 1080                  | 0                              | 0                    |
| 5          | 1106                  | 26                             | 17,482               |
| 10         | 1207                  | 127                            | 85,395               |
| 15         | 1519                  | 439                            | 295,184              |
| 20         | 1579                  | 499                            | 335,528              |
| 25         | 1703                  | 623                            | 418,905              |
| 30         | 1708                  | 628                            | 422,267              |
| 35         | 1688                  | 608                            | 408,819              |
| 40         | 1644                  | 564                            | 379,234              |
| 45         | 1590                  | 510                            | 342,924              |
| 50         | 1546                  | 466                            | 313,338              |
| 55         | 1486                  | 406                            | 272,994              |
| 60         | 1445                  | 365                            | 245,426              |
| 65         | 1399                  | 319                            | 214,496              |
| 70         | 1335                  | 255                            | 171,462              |
| 75         | 1307                  | 227                            | 152,635              |
| 80         | 1288                  | 208                            | 139,859              |
| 85         | 1256                  | 176                            | 118,342              |
| 90         | 1231                  | 151                            | 101,532              |
| 95         | 1176                  | 96                             | 64,550               |
| 100        | 1170                  | 90                             | 60,516               |
| 105        | 1163                  | 83                             | 55,809               |
| 110        | 1155                  | 75                             | 50,430               |
| 115        | 1139                  | 59                             | 39,672               |
| 120        | 1131                  | 51                             | 34,292               |
| 125        | 1122                  | 42                             | 28,241               |
| 130        | 1118                  | 38                             | 25,551               |
| 135        | 1106                  | 26                             | 17,482               |
| 140        | 1102                  | 22                             | 14,793               |
| 145        | 1101                  | 21                             | 14,120               |
| 150        | 1099                  | 19                             | 12,776               |
| 155        | 1092                  | 12                             | 8,069                |
| 160        | 1089                  | 9                              | 6,052                |
| 165        | 1088                  | 8                              | 5,379                |
| 170        | 1088                  | 8                              | 5,379                |
| 175        | 1087                  | 7                              | 4,707                |
| 180        | 1086                  | 6                              | 4,034                |
| 185        | 1086                  | 6                              | 4,034                |
| 190        | 1086                  | 6                              | 4,034                |
| 195        | 1085                  | 5                              | 3,362                |
| 200        | 1085                  | 5                              | 3,362                |
| 205        | 1084                  | 4                              | 2,690                |
| 210        | 1083                  | 3                              | 2,017                |
| 215        | 1083                  | 3                              | 2,017                |
| 220        | 1082                  | 2                              | 1,345                |
| 225        | 1082                  | 2                              | 1,345                |
| 230        | 1082                  | 2                              | 1,345                |
| 235        | 1081                  | 1                              | 0,672                |
| 240        | 1080                  | 0                              | 0                    |

**Tabla B.2:**  
**Resultado del aforo químico en el Punto 1 (7-febrero-2007).**

|                                | Valor              | Error |
|--------------------------------|--------------------|-------|
| Masa [mg]                      | 1.000.000 ± 20.000 | 2%    |
| Área bajo la curva [mg · s/ l] | 25.000 ± 1.000     | 6,0%  |
| Q [l/s]                        | 41 ± 3             | 8,0%  |

**Tabla B.3:**  
**Aforo químico en el Punto 2 (7- febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0          | 1076                  | 0                              | 0                    |
| 5          | 1077                  | 1                              | 0,672                |
| 10         | 1084                  | 8                              | 5,379                |
| 15         | 1095                  | 19                             | 12,776               |
| 20         | 1106                  | 30                             | 20,172               |
| 25         | 1146                  | 70                             | 47,068               |
| 30         | 1179                  | 103                            | 69,257               |
| 35         | 1210                  | 134                            | 90,102               |
| 40         | 1251                  | 175                            | 117,670              |
| 45         | 1288                  | 212                            | 142,549              |
| 50         | 1327                  | 251                            | 168,772              |
| 55         | 1350                  | 274                            | 184,238              |
| 60         | 1362                  | 286                            | 192,306              |
| 65         | 1370                  | 294                            | 197,686              |
| 70         | 1365                  | 289                            | 194,324              |
| 75         | 1355                  | 279                            | 187,600              |
| 80         | 1353                  | 277                            | 186,255              |
| 85         | 1343                  | 267                            | 179,531              |
| 90         | 1336                  | 260                            | 174,824              |
| 95         | 1320                  | 244                            | 164,066              |
| 100        | 1300                  | 224                            | 150,618              |
| 105        | 1286                  | 210                            | 141,204              |
| 110        | 1272                  | 196                            | 131,790              |
| 115        | 1256                  | 180                            | 121,032              |
| 120        | 1240                  | 164                            | 110,274              |
| 125        | 1233                  | 157                            | 105,567              |
| 130        | 1223                  | 147                            | 98,843               |
| 135        | 1207                  | 131                            | 88,084               |
| 140        | 1200                  | 124                            | 83,378               |
| 145        | 1187                  | 111                            | 74,636               |
| 150        | 1180                  | 104                            | 69,930               |
| 155        | 1171                  | 95                             | 63,878               |
| 160        | 1163                  | 87                             | 58,499               |
| 165        | 1157                  | 81                             | 54,464               |
| 170        | 1137                  | 61                             | 41,016               |
| 175        | 1129                  | 53                             | 35,637               |
| 180        | 1128                  | 52                             | 34,965               |
| 185        | 1127                  | 51                             | 34,292               |
| 190        | 1120                  | 44                             | 29,586               |
| 195        | 1115                  | 39                             | 26,224               |
| 200        | 1116                  | 40                             | 26,896               |
| 205        | 1115                  | 39                             | 26,224               |
| 210        | 1107                  | 31                             | 20,844               |
| 215        | 1104                  | 28                             | 18,827               |
| 220        | 1103                  | 27                             | 18,155               |
| 225        | 1100                  | 24                             | 16,138               |
| 230        | 1097                  | 21                             | 14,120               |
| 235        | 1095                  | 19                             | 12,776               |
| 240        | 1094                  | 18                             | 12,103               |
| 245        | 1091                  | 15                             | 10,086               |
| 250        | 1090                  | 14                             | 9,414                |
| 255        | 1088                  | 12                             | 8,069                |



**Tabla B.4:**  
**Continuación de los datos medidos para el aforo químico en el Punto 2 (7- febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 260        | 1087                  | 11                             | 7,396                |
| 265        | 1086                  | 10                             | 6,724                |
| 270        | 1085                  | 9                              | 6,052                |
| 275        | 1084                  | 8                              | 5,379                |
| 280        | 1084                  | 8                              | 5,379                |
| 285        | 1082                  | 6                              | 4,034                |
| 290        | 1080                  | 4                              | 2,690                |
| 295        | 1079                  | 3                              | 2,017                |
| 300        | 1079                  | 3                              | 2,017                |
| 305        | 1078                  | 2                              | 1,345                |
| 310        | 1077                  | 1                              | 0,672                |
| 315        | 1077                  | 1                              | 0,672                |
| 320        | 1076                  | 0                              | 0                    |

**Tabla B.5:**  
**Resultado del aforo químico en el Punto 2 (7- febrero-2007).**

|                                 | Valor            | Error |
|---------------------------------|------------------|-------|
| Masa [mg]                       | 900.000 ± 20.000 | 2%    |
| Área bajo la curva [mg · s/ l ] | 21.000 ± 2.000   | 8,1%  |
| Q [l/s]                         | 44 ± 5           | 10,3% |

**Tabla B.6:**  
**Aforo químico en el Punto 3 (7- febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0          | 1081                  | 0                              | 0                    |
| 5          | 1083                  | 2                              | 1,345                |
| 10         | 1084                  | 3                              | 2,017                |
| 15         | 1089                  | 8                              | 5,379                |
| 20         | 1100                  | 19                             | 12,776               |
| 25         | 1108                  | 27                             | 18,155               |
| 30         | 1128                  | 47                             | 31,603               |
| 35         | 1143                  | 62                             | 41,689               |
| 40         | 1151                  | 70                             | 47,068               |
| 45         | 1182                  | 101                            | 67,912               |
| 50         | 1194                  | 113                            | 75,981               |
| 55         | 1211                  | 130                            | 87,412               |
| 60         | 1241                  | 160                            | 107,584              |
| 65         | 1252                  | 171                            | 114,980              |
| 70         | 1273                  | 192                            | 129,101              |
| 75         | 1278                  | 197                            | 132,463              |
| 80         | 1285                  | 204                            | 137,170              |
| 85         | 1293                  | 212                            | 142,549              |
| 90         | 1291                  | 210                            | 141,204              |
| 95         | 1287                  | 206                            | 138,514              |
| 100        | 1289                  | 208                            | 139,859              |
| 105        | 1291                  | 210                            | 141,204              |
| 110        | 1288                  | 207                            | 139,187              |
| 115        | 1282                  | 201                            | 135,152              |
| 120        | 1274                  | 193                            | 129,773              |
| 125        | 1274                  | 193                            | 129,773              |
| 130        | 1265                  | 184                            | 123,722              |
| 135        | 1258                  | 177                            | 119,015              |
| 140        | 1252                  | 171                            | 114,980              |
| 145        | 1240                  | 159                            | 106,912              |
| 150        | 1232                  | 151                            | 101,532              |
| 155        | 1227                  | 146                            | 98,170               |

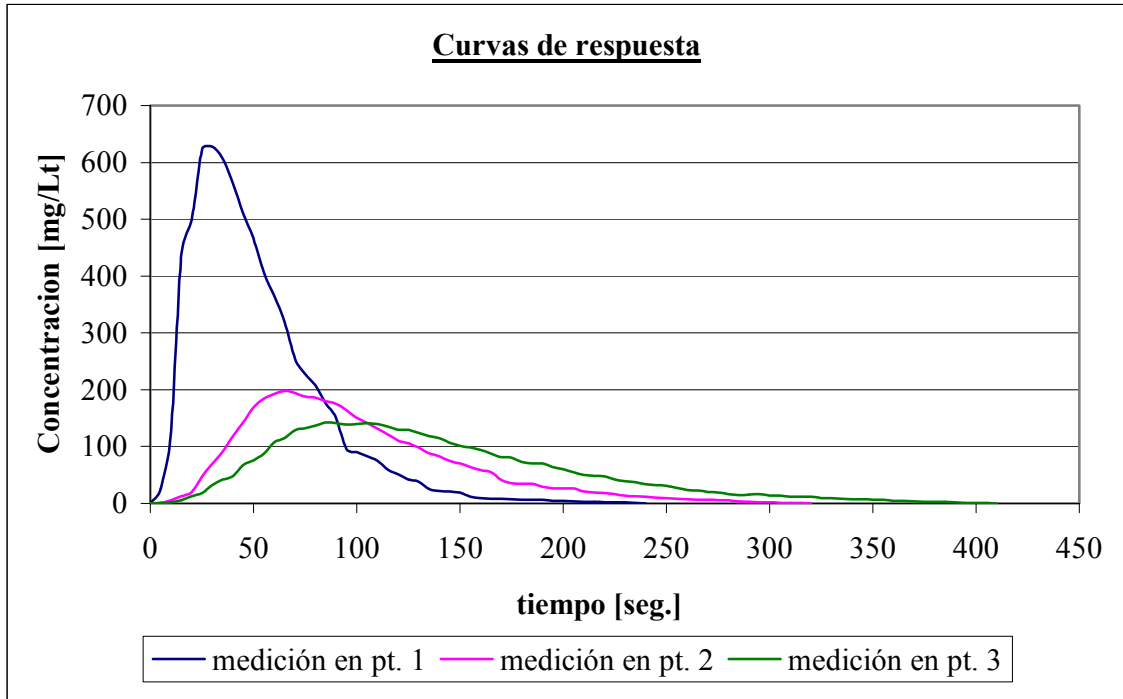
**Tabla B.7:**  
**Continuación de los datos medidos para el aforo químico en el Punto 3 (7- febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 160        | 1221                  | 140                            | 94,136               |
| 165        | 1211                  | 130                            | 87,412               |
| 170        | 1202                  | 121                            | 81,360               |
| 175        | 1200                  | 119                            | 80,016               |
| 180        | 1190                  | 109                            | 73,292               |
| 185        | 1186                  | 105                            | 70,602               |
| 190        | 1185                  | 104                            | 69,930               |
| 195        | 1176                  | 95                             | 63,878               |
| 200        | 1170                  | 89                             | 59,844               |
| 205        | 1162                  | 81                             | 54,464               |
| 210        | 1155                  | 74                             | 49,758               |
| 215        | 1153                  | 72                             | 48,413               |
| 220        | 1152                  | 71                             | 47,740               |
| 225        | 1144                  | 63                             | 42,361               |
| 230        | 1139                  | 58                             | 38,999               |
| 235        | 1137                  | 56                             | 37,654               |
| 240        | 1131                  | 50                             | 33,620               |
| 245        | 1128                  | 47                             | 31,603               |
| 250        | 1127                  | 46                             | 30,930               |
| 255        | 1122                  | 41                             | 27,568               |
| 260        | 1116                  | 35                             | 23,534               |
| 265        | 1115                  | 34                             | 22,862               |
| 270        | 1111                  | 30                             | 20,172               |
| 275        | 1110                  | 29                             | 19,500               |
| 280        | 1106                  | 25                             | 16,810               |
| 285        | 1103                  | 22                             | 14,793               |
| 290        | 1104                  | 23                             | 15,465               |
| 295        | 1105                  | 24                             | 16,138               |
| 300        | 1101                  | 20                             | 13,448               |
| 305        | 1101                  | 20                             | 13,448               |
| 310        | 1099                  | 18                             | 12,103               |
| 315        | 1098                  | 17                             | 11,431               |
| 320        | 1098                  | 17                             | 11,431               |
| 325        | 1095                  | 14                             | 9,414                |
| 330        | 1094                  | 13                             | 8,741                |
| 335        | 1093                  | 12                             | 8,069                |
| 340        | 1092                  | 11                             | 7,396                |
| 345        | 1092                  | 11                             | 7,396                |
| 350        | 1091                  | 10                             | 6,724                |
| 355        | 1090                  | 9                              | 6,052                |
| 360        | 1088                  | 7                              | 4,707                |
| 365        | 1088                  | 7                              | 4,707                |
| 370        | 1087                  | 6                              | 4,034                |
| 375        | 1085                  | 4                              | 2,690                |
| 380        | 1085                  | 4                              | 2,690                |
| 385        | 1085                  | 4                              | 2,690                |
| 390        | 1084                  | 3                              | 2,017                |
| 395        | 1083                  | 2                              | 1,345                |
| 400        | 1083                  | 2                              | 1,345                |
| 405        | 1082                  | 1                              | 0,672                |
| 410        | 1081                  | 0                              | 0                    |

**Tabla B.8:**  
**Resultado del aforo químico en el Punto 3 (7- febrero-2007).**

|                                       | Valor            | Error |
|---------------------------------------|------------------|-------|
| <b>Masa [mg]</b>                      | 940.000 ± 20.000 | 2%    |
| <b>Área bajo la curva [mg · s/ l]</b> | 22.000 ± 2.000   | 9,4%  |
| <b>Q [l/s]</b>                        | 43 ± 5           | 11,5% |

**Figura B.1:**  
**Curvas de respuesta de los aforos químicos anteriores (7- febrero-2007).**



**Tabla B.9:**  
**Aforo químico en el Punto 2 (23-febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0          | 1250                  | 0                              | 0                    |
| 5          | 1269                  | 19                             | 13                   |
| 10         | 1306                  | 56                             | 38                   |
| 15         | 1384                  | 134                            | 90                   |
| 20         | 1459                  | 209                            | 141                  |
| 25         | 1547                  | 297                            | 200                  |
| 30         | 1604                  | 354                            | 238                  |
| 35         | 1650                  | 400                            | 269                  |
| 40         | 1657                  | 407                            | 274                  |
| 45         | 1685                  | 435                            | 292                  |
| 50         | 1683                  | 433                            | 291                  |
| 55         | 1674                  | 424                            | 285                  |
| 60         | 1659                  | 409                            | 275                  |
| 65         | 1639                  | 389                            | 262                  |
| 70         | 1610                  | 360                            | 242                  |
| 75         | 1587                  | 337                            | 227                  |
| 80         | 1562                  | 312                            | 210                  |
| 85         | 1523                  | 273                            | 184                  |
| 90         | 1516                  | 266                            | 179                  |
| 95         | 1484                  | 234                            | 157                  |
| 100        | 1454                  | 204                            | 137                  |
| 105        | 1436                  | 186                            | 125                  |
| 110        | 1408                  | 158                            | 106                  |
| 115        | 1396                  | 146                            | 98                   |
| 120        | 1384                  | 134                            | 90                   |
| 125        | 1360                  | 110                            | 74                   |
| 130        | 1342                  | 92                             | 62                   |
| 135        | 1342                  | 92                             | 62                   |
| 140        | 1331                  | 81                             | 54                   |
| 145        | 1320                  | 70                             | 47                   |

**Tabla B.10:**  
**Continuación de los datos medidos para el aforo químico en el Punto 2 (23-febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 150        | 1312                  | 62                             | 42                   |
| 155        | 1308                  | 58                             | 39                   |
| 160        | 1297                  | 47                             | 32                   |
| 165        | 1293                  | 43                             | 29                   |
| 170        | 1286                  | 36                             | 24                   |
| 175        | 1278                  | 28                             | 19                   |
| 180        | 1276                  | 26                             | 17                   |
| 185        | 1274                  | 24                             | 16                   |
| 190        | 1272                  | 22                             | 15                   |
| 195        | 1269                  | 19                             | 13                   |
| 200        | 1263                  | 13                             | 9                    |
| 205        | 1261                  | 11                             | 7                    |
| 210        | 1261                  | 11                             | 7                    |
| 215        | 1261                  | 11                             | 7                    |
| 220        | 1259                  | 9                              | 6                    |
| 225        | 1259                  | 9                              | 6                    |
| 230        | 1256                  | 6                              | 4                    |
| 235        | 1255                  | 5                              | 3                    |
| 240        | 1254                  | 4                              | 3                    |
| 245        | 1253                  | 3                              | 2                    |
| 250        | 1253                  | 3                              | 2                    |
| 255        | 1252                  | 2                              | 1                    |
| 260        | 1252                  | 2                              | 1                    |
| 265        | 1251                  | 1                              | 1                    |
| 270        | 1251                  | 1                              | 1                    |
| 275        | 1250                  | 0                              | 0                    |

**Tabla B.11:**  
**Resultado del aforo químico en el Punto 2 (23-febrero-2007).**

|                               | Valor     |          | Error |
|-------------------------------|-----------|----------|-------|
| Masa [mg]                     | 1.000.000 | ± 20.000 | 2%    |
| Área bajo la curva [mg · s/l] | 25.000    | ± 2.000  | 7,1%  |
| Q [l/s]                       | 40        | ± 4      | 9,1%  |

**Tabla B.12:**  
**Primer aforo químico en el Punto 4 (23- febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0          | 1259                  | 0                              | 0                    |
| 5          | 1263                  | 4                              | 3                    |
| 10         | 1266                  | 7                              | 5                    |
| 15         | 1272                  | 13                             | 9                    |
| 20         | 1279                  | 20                             | 13                   |
| 25         | 1287                  | 28                             | 19                   |
| 30         | 1300                  | 41                             | 28                   |
| 35         | 1316                  | 57                             | 38                   |
| 40         | 1331                  | 72                             | 48                   |
| 45         | 1353                  | 94                             | 63                   |
| 50         | 1376                  | 117                            | 79                   |
| 55         | 1390                  | 131                            | 88                   |
| 60         | 1409                  | 150                            | 101                  |
| 65         | 1437                  | 178                            | 120                  |
| 70         | 1464                  | 205                            | 138                  |
| 75         | 1487                  | 228                            | 153                  |
| 80         | 1509                  | 250                            | 168                  |
| 85         | 1532                  | 273                            | 184                  |
| 90         | 1552                  | 293                            | 197                  |

**Tabla B.13:**  
**Continuación de los datos medidos para el primer aforo químico en el Punto 4**  
**(23-febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 95         | 1571                  | 312                            | 210                  |
| 100        | 1588                  | 329                            | 221                  |
| 105        | 1604                  | 345                            | 232                  |
| 110        | 1619                  | 360                            | 242                  |
| 115        | 1624                  | 365                            | 245                  |
| 120        | 1634                  | 375                            | 252                  |
| 125        | 1640                  | 381                            | 256                  |
| 130        | 1643                  | 384                            | 258                  |
| 135        | 1645                  | 386                            | 260                  |
| 140        | 1644                  | 385                            | 259                  |
| 145        | 1642                  | 383                            | 258                  |
| 150        | 1639                  | 380                            | 256                  |
| 155        | 1632                  | 373                            | 251                  |
| 160        | 1625                  | 366                            | 246                  |
| 165        | 1618                  | 359                            | 241                  |
| 170        | 1607                  | 348                            | 234                  |
| 175        | 1596                  | 337                            | 227                  |
| 180        | 1587                  | 328                            | 221                  |
| 185        | 1574                  | 315                            | 212                  |
| 190        | 1563                  | 304                            | 204                  |
| 195        | 1552                  | 293                            | 197                  |
| 200        | 1538                  | 279                            | 188                  |
| 205        | 1526                  | 267                            | 180                  |
| 210        | 1512                  | 253                            | 170                  |
| 215        | 1499                  | 240                            | 161                  |
| 220        | 1489                  | 230                            | 155                  |
| 225        | 1478                  | 219                            | 147                  |
| 230        | 1465                  | 206                            | 139                  |
| 235        | 1455                  | 196                            | 132                  |
| 240        | 1443                  | 184                            | 124                  |
| 245        | 1434                  | 175                            | 118                  |
| 250        | 1421                  | 162                            | 109                  |
| 255        | 1412                  | 153                            | 103                  |
| 260        | 1402                  | 143                            | 96                   |
| 265        | 1394                  | 135                            | 91                   |
| 270        | 1384                  | 125                            | 84                   |
| 275        | 1378                  | 119                            | 80                   |
| 280        | 1369                  | 110                            | 74                   |
| 285        | 1363                  | 104                            | 70                   |
| 290        | 1359                  | 100                            | 67                   |
| 295        | 1353                  | 94                             | 63                   |
| 300        | 1344                  | 85                             | 57                   |
| 305        | 1339                  | 80                             | 54                   |
| 310        | 1333                  | 74                             | 50                   |
| 315        | 1329                  | 70                             | 47                   |
| 320        | 1323                  | 64                             | 43                   |
| 325        | 1320                  | 61                             | 41                   |
| 330        | 1315                  | 56                             | 38                   |
| 335        | 1312                  | 53                             | 36                   |
| 340        | 1308                  | 49                             | 33                   |
| 345        | 1305                  | 46                             | 31                   |
| 350        | 1301                  | 42                             | 28                   |
| 355        | 1298                  | 39                             | 26                   |
| 360        | 1297                  | 38                             | 26                   |
| 365        | 1294                  | 35                             | 24                   |
| 370        | 1292                  | 33                             | 22                   |
| 375        | 1290                  | 31                             | 21                   |
| 380        | 1287                  | 28                             | 19                   |
| 385        | 1286                  | 27                             | 18                   |
| 390        | 1284                  | 25                             | 17                   |
| 395        | 1281                  | 22                             | 15                   |
| 400        | 1280                  | 21                             | 14                   |
| 405        | 1278                  | 19                             | 13                   |

**Tabla B.14:**  
**Continuación de los datos medidos para el primer aforo químico en el Punto 4**  
**(23-febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 410        | 1277                  | 18                             | 12                   |
| 415        | 1276                  | 17                             | 11                   |
| 420        | 1275                  | 16                             | 11                   |
| 425        | 1273                  | 14                             | 9                    |
| 430        | 1273                  | 14                             | 9                    |
| 435        | 1272                  | 13                             | 9                    |
| 440        | 1271                  | 12                             | 8                    |
| 445        | 1270                  | 11                             | 7                    |
| 450        | 1269                  | 10                             | 7                    |
| 455        | 1269                  | 10                             | 7                    |
| 460        | 1268                  | 9                              | 6                    |
| 465        | 1267                  | 8                              | 5                    |
| 470        | 1267                  | 8                              | 5                    |
| 475        | 1266                  | 7                              | 5                    |
| 480        | 1266                  | 7                              | 5                    |
| 485        | 1265                  | 6                              | 4                    |
| 490        | 1265                  | 6                              | 4                    |
| 495        | 1265                  | 6                              | 4                    |
| 500        | 1264                  | 5                              | 3                    |
| 505        | 1264                  | 5                              | 3                    |
| 510        | 1264                  | 5                              | 3                    |
| 515        | 1263                  | 4                              | 3                    |
| 520        | 1263                  | 4                              | 3                    |
| 525        | 1263                  | 4                              | 3                    |
| 530        | 1262                  | 3                              | 2                    |
| 535        | 1262                  | 3                              | 2                    |
| 540        | 1262                  | 3                              | 2                    |
| 545        | 1262                  | 3                              | 2                    |
| 550        | 1261                  | 2                              | 1                    |
| 555        | 1261                  | 2                              | 1                    |
| 560        | 1261                  | 2                              | 1                    |
| 565        | 1261                  | 2                              | 1                    |
| 570        | 1261                  | 2                              | 1                    |
| 575        | 1261                  | 2                              | 1                    |
| 580        | 1260                  | 1                              | 1                    |
| 585        | 1260                  | 1                              | 1                    |
| 590        | 1260                  | 1                              | 1                    |
| 595        | 1260                  | 1                              | 1                    |
| 600        | 1260                  | 1                              | 1                    |
| 605        | 1260                  | 1                              | 1                    |
| 610        | 1259                  | 0                              | 0                    |

**Tabla B.15:**  
**Resultado del aforo químico en el Punto 4 (23-febrero-2007).**

|                               | Valor     |          | Error |
|-------------------------------|-----------|----------|-------|
| Masa [mg]                     | 2.000.000 | ± 20.000 | 1%    |
| Área bajo la curva [mg · s/l] | 48.000    | ± 4.000  | 7,9%  |
| Q [l/s]                       | 42        | ± 4      | 8,9%  |

**Tabla B.16:  
Segundo aforo químico en el Punto 4 (23- febrero-2007).**

| Tiempo [s] | Conductividad<br>[us/cm] | Conductividad sin<br>base [us/cm] | Concentración<br>[mg/l] |
|------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 0          | 1255                     | 0                                 | 0                       |
| 5          | 1259                     | 4                                 | 3                       |
| 10         | 1264                     | 9                                 | 6                       |
| 15         | 1270                     | 15                                | 10                      |
| 20         | 1277                     | 22                                | 15                      |
| 25         | 1289                     | 34                                | 23                      |
| 30         | 1304                     | 49                                | 33                      |
| 35         | 1323                     | 68                                | 46                      |
| 40         | 1336                     | 81                                | 54                      |
| 45         | 1360                     | 105                               | 71                      |
| 50         | 1383                     | 128                               | 86                      |
| 55         | 1408                     | 153                               | 103                     |
| 60         | 1436                     | 181                               | 122                     |
| 65         | 1452                     | 197                               | 132                     |
| 70         | 1478                     | 223                               | 150                     |
| 75         | 1505                     | 250                               | 168                     |
| 80         | 1524                     | 269                               | 181                     |
| 85         | 1555                     | 300                               | 202                     |
| 90         | 1569                     | 314                               | 211                     |
| 95         | 1590                     | 335                               | 225                     |
| 100        | 1603                     | 348                               | 234                     |
| 105        | 1621                     | 366                               | 246                     |
| 110        | 1627                     | 372                               | 250                     |
| 115        | 1640                     | 385                               | 259                     |
| 120        | 1646                     | 391                               | 263                     |
| 125        | 1653                     | 398                               | 268                     |
| 130        | 1654                     | 399                               | 268                     |
| 135        | 1655                     | 400                               | 269                     |
| 140        | 1653                     | 398                               | 268                     |
| 145        | 1649                     | 394                               | 265                     |
| 150        | 1644                     | 389                               | 262                     |
| 155        | 1638                     | 383                               | 258                     |
| 160        | 1628                     | 373                               | 251                     |
| 165        | 1620                     | 365                               | 245                     |
| 170        | 1609                     | 354                               | 238                     |
| 175        | 1598                     | 343                               | 231                     |
| 180        | 1587                     | 332                               | 223                     |
| 185        | 1575                     | 320                               | 215                     |
| 190        | 1560                     | 305                               | 205                     |
| 195        | 1548                     | 293                               | 197                     |
| 200        | 1538                     | 283                               | 190                     |
| 205        | 1522                     | 267                               | 180                     |
| 210        | 1511                     | 256                               | 172                     |
| 215        | 1497                     | 242                               | 163                     |
| 220        | 1483                     | 228                               | 153                     |
| 225        | 1471                     | 216                               | 145                     |
| 230        | 1462                     | 207                               | 139                     |
| 235        | 1445                     | 190                               | 128                     |
| 240        | 1437                     | 182                               | 122                     |
| 245        | 1426                     | 171                               | 115                     |
| 250        | 1418                     | 163                               | 110                     |
| 255        | 1408                     | 153                               | 103                     |
| 260        | 1397                     | 142                               | 95                      |
| 265        | 1389                     | 134                               | 90                      |
| 270        | 1378                     | 123                               | 83                      |
| 275        | 1371                     | 116                               | 78                      |
| 280        | 1364                     | 109                               | 73                      |
| 285        | 1359                     | 104                               | 70                      |
| 290        | 1350                     | 95                                | 64                      |
| 295        | 1345                     | 90                                | 61                      |
| 300        | 1338                     | 83                                | 56                      |
| 305        | 1331                     | 76                                | 51                      |
| 310        | 1327                     | 72                                | 48                      |
| 315        | 1322                     | 67                                | 45                      |
| 320        | 1317                     | 62                                | 42                      |

**Tabla B.17:**  
**Continuación de los datos medidos para el segundo aforo químico en el Punto 4**  
**(23-febrero-2007).**

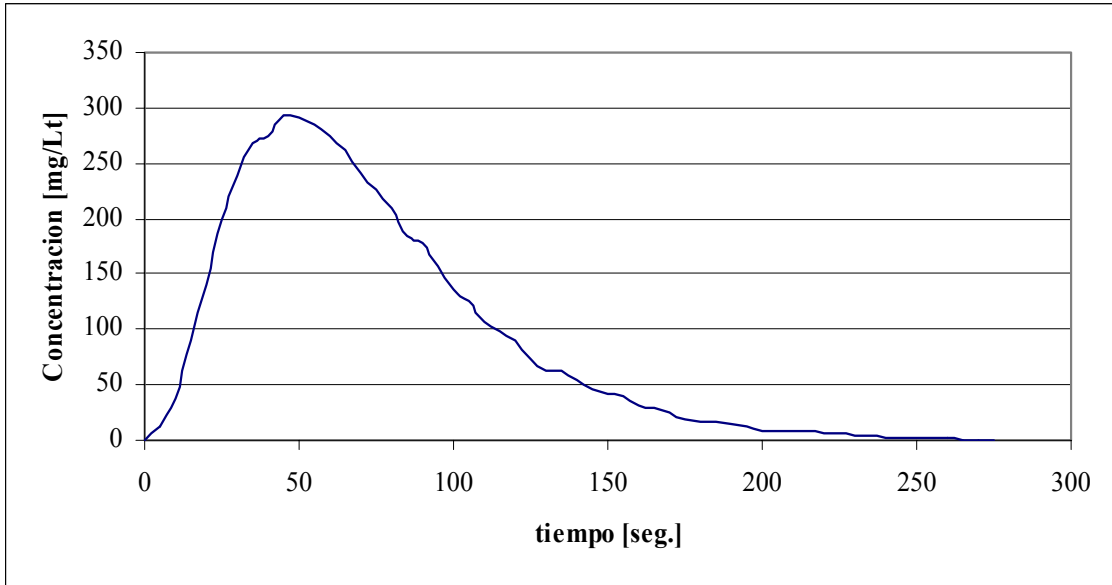
| Tiempo [s] | Conductividad [us/cm] | Conductividad sin base [us/cm] | Concentración [mg/l] |
|------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| 325        | 1313                  | 58                             | 39                   |
| 330        | 1309                  | 54                             | 36                   |
| 335        | 1304                  | 49                             | 33                   |
| 340        | 1300                  | 45                             | 30                   |
| 345        | 1297                  | 42                             | 28                   |
| 350        | 1295                  | 40                             | 27                   |
| 355        | 1293                  | 38                             | 26                   |
| 360        | 1290                  | 35                             | 24                   |
| 365        | 1288                  | 33                             | 22                   |
| 370        | 1285                  | 30                             | 20                   |
| 375        | 1281                  | 26                             | 17                   |
| 380        | 1280                  | 25                             | 17                   |
| 385        | 1278                  | 23                             | 15                   |
| 390        | 1276                  | 21                             | 14                   |
| 395        | 1275                  | 20                             | 13                   |
| 400        | 1273                  | 18                             | 12                   |
| 405        | 1272                  | 17                             | 11                   |
| 410        | 1270                  | 15                             | 10                   |
| 415        | 1269                  | 14                             | 9                    |
| 420        | 1268                  | 13                             | 9                    |
| 425        | 1267                  | 12                             | 8                    |
| 430        | 1266                  | 11                             | 7                    |
| 435        | 1266                  | 11                             | 7                    |
| 440        | 1265                  | 10                             | 7                    |
| 445        | 1264                  | 9                              | 6                    |
| 450        | 1263                  | 8                              | 5                    |
| 455        | 1262                  | 7                              | 5                    |
| 460        | 1262                  | 7                              | 5                    |
| 465        | 1261                  | 6                              | 4                    |
| 470        | 1260                  | 5                              | 3                    |
| 475        | 1260                  | 5                              | 3                    |
| 480        | 1260                  | 5                              | 3                    |
| 485        | 1259                  | 4                              | 3                    |
| 490        | 1259                  | 4                              | 3                    |
| 495        | 1258                  | 3                              | 2                    |
| 500        | 1258                  | 3                              | 2                    |
| 505        | 1258                  | 3                              | 2                    |
| 510        | 1257                  | 2                              | 1                    |
| 515        | 1257                  | 2                              | 1                    |
| 520        | 1257                  | 2                              | 1                    |
| 525        | 1256                  | 1                              | 1                    |
| 530        | 1256                  | 1                              | 1                    |
| 535        | 1256                  | 1                              | 1                    |
| 540        | 1256                  | 1                              | 1                    |
| 545        | 1255                  | 0                              | 0                    |

**Tabla B.18:**  
**Resultado del aforo químico en el Punto 4 (23-febrero-2007).**

|                                 | Valor     |          | Error |
|---------------------------------|-----------|----------|-------|
| Masa [mg]                       | 2.000.000 | ± 20.000 | 1%    |
| Área bajo la curva [mg · s / l] | 50.000    | ± 4.000  | 7,2%  |
| Q [l/s]                         | 41        | ± 3      | 8,2%  |



**Figura B.2:**  
**Curvas de respuesta del aforo químico en el Punto 2 (23-febrero-2007).**



**Figura B.3:**  
**Curvas de respuesta de los aforos químicos en el punto 4 (23-febrero-2007).**

