

# Hidrología Superficial (I): Medidas y Tratamiento de los datos

## Medidas de los caudales: Tipos de aforos

### Aforos Directos

- Molinete
- Aforos químicos
  - Aforos de vertido constante
  - Aforos de vertido único o de integración

### Aforos indirectos

- Escalas limnimétricas
- Limnígrafos

### Presentación de los datos de aforos

### Tratamiento estadístico de los datos de aforos

### Apéndice Elaboración de los datos en un aforo con molinete

## Medidas de los caudales: Tipos de aforos

Aforar es medir un caudal. En Hidrología superficial puede ser necesario medir desde pequeños caudales (unos pocos litros /seg.) hasta ríos de muchos m<sup>3</sup>/seg. Distinguimos dos tipos:

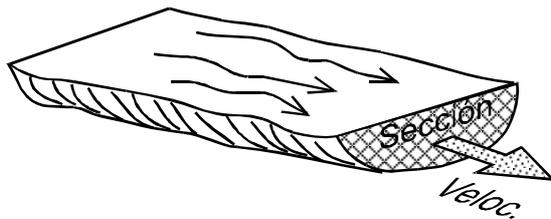
- *Aforos directos*. Con algún aparato o procedimiento medimos directamente el caudal
- *Aforos indirectos o continuos*. Medimos el nivel del agua en el cauce, y a partir del nivel estimamos el caudal.

Para medir el caudal diariamente o de un modo continuo en diversos puntos de una cuenca se utilizan los aforos indirectos, por eso también se les denomina continuos.

## Aforos Directos

### Molinete

El procedimiento se basa en medir la velocidad del agua y aplicar a ecuación:



$$\text{Caudal} = \text{Sección} \times \text{Velocidad}$$

$$\text{m}^3/\text{seg} = \text{m}^2 \times \text{m}/\text{seg}$$

Para una estimación aproximada la velocidad se calcula arrojando algún objeto que flote al agua, y la sección se estima muy aproximadamente. Este procedimiento da grandes errores, pero proporciona

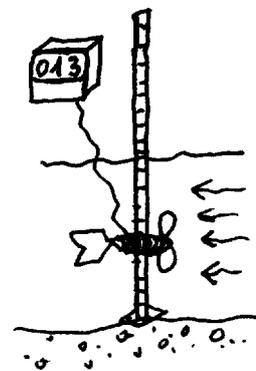
un orden de magnitud.

La medida exacta se realiza con un molinete, que mide la velocidad de la corriente en varios puntos de la misma vertical y en varias verticales de la sección del cauce. A la vez que se

miden las velocidades se mide la anchura exacta del cauce y la profundidad en cada vertical, lo que nos permite establecer la sección con bastante precisión.

### Aforos químicos

Su fundamento es el siguiente: Si arrojamos una sustancia de concentración conocida a un cauce, se diluye en la corriente, y aguas abajo tomamos muestras y las analizamos, cuanto mayor sea el caudal, más diluídas estarán las muestras analizadas. La aplicación concreta de este principio se plasma en dos procedimientos distintos:



#### Aforos de vertido constante

A un cauce de caudal  $Q$  se añade un pequeño caudal continuo  $q$  de una disolución de concentración  $C_1$ . Supongamos que el río ya tenía una concentración  $C_0$  de esa misma sustancia. Se cumplirá que:

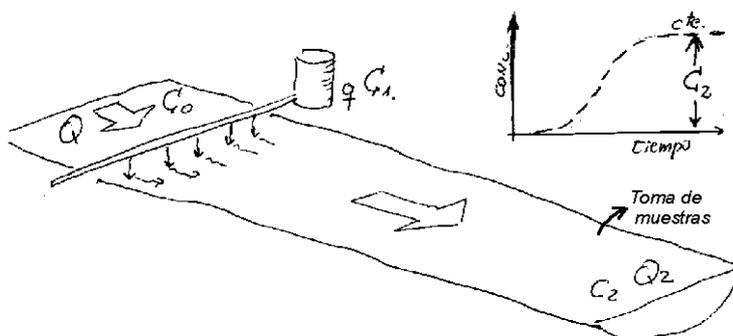
$$Q \cdot C_0 + q \cdot C_1 = C_2 \cdot Q_2$$

Pero como  $C_0 \approx 0$

$$q \cdot C_1 = C_2 \cdot Q_2$$

y como  $Q_2 \approx Q$  (es decir que el caudal del río prácticamente no ha variado con el vertido  $q$ ), finalmente:

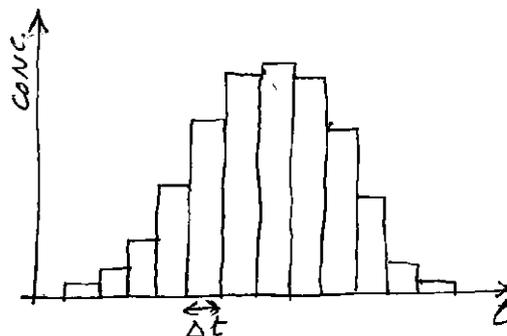
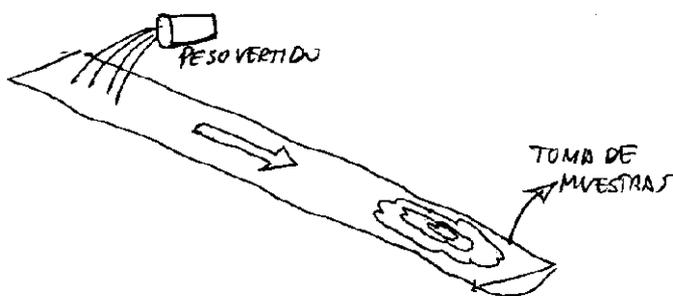
$$Q = q \frac{C_1}{C_2} \quad (*)$$



#### Aforos de vertido único o de integración

Si no se dispone del equipo necesario para el vertido continuo o no es posible por otras razones, el vertido único de una sustancia al cauce es otra alternativa, aunque requiere una corriente turbulenta que asegure la mezcla del vertido con todo el caudal circulante hasta el punto de toma de muestras.

Se vierte un peso de  $P$  gramos; aguas abajo, y supuesta la homogeneización, se toman varias



muestras a intervalos iguales de tiempo  $\Delta t$ , calculando previamente el principio y el final de la

(\*) Es fácil comprobar que si la concentración que trae el río no es despreciable, resulta:  $Q = q \frac{C_1}{(C_2 - C_0)}$

toma de muestras con un colorante. Las concentraciones en las  $n$  muestras tomadas serían  $C_1$ ,  $C_2$ , ...  $C_n$ . El cálculo sería así:

$$\begin{aligned} \text{Peso vertido} &= \text{Peso que pasa en el } 1^{\text{er}} \Delta t + \text{Peso en el } 2^{\text{o}} \Delta t + \dots + \text{Peso en el último } \Delta t = \\ &= C_1 \cdot \text{Vol que pasa en el } 1^{\text{er}} \Delta t + C_2 \cdot \text{Vol en el } 2^{\text{o}} \Delta t + \dots + C_n \cdot \text{Vol en el último } \Delta t = \\ &= C_1 \cdot Q \cdot \Delta t + C_2 \cdot Q \cdot \Delta t + \dots + C_n \cdot Q \cdot \Delta t = \\ &= Q \cdot \Delta t \cdot (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \end{aligned}$$

Por tanto el caudal  $Q$  que queremos medir será igual a:

$$Q = \frac{\text{Peso vertido}}{\Delta t \cdot (C_1 + C_2 + \dots + C_n)}$$

(Debemos suponer que la concentración que traía el río era 0)

## Aforos indirectos

### Escalas limnimétricas

Se trata de escalas graduadas en centímetros y firmemente sujetas en el suelo. En cauces muy abiertos suele ser necesario instalar varias de manera que sus escalas se sucedan correlativamente. Es necesario que un operario acuda cada día a tomar nota de la altura del agua.

### Linnígrafos

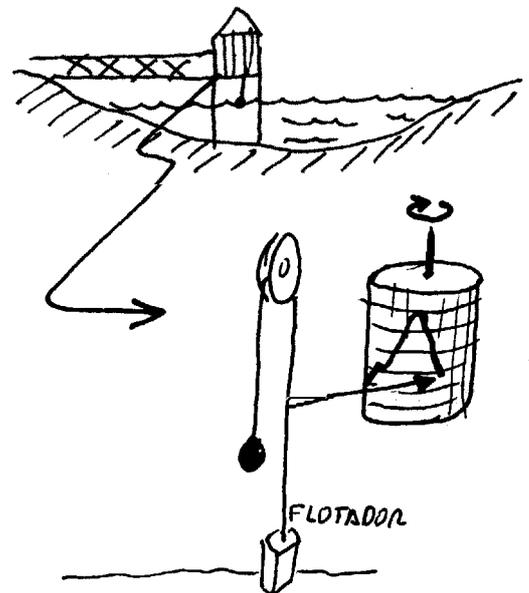
Miden el nivel guardando un registro gráfico o digital del mismo a lo largo del tiempo. El gráfico que proporcionan (altura del agua en función del tiempo) se denomina linnigrama. No solamente evitan la presencia diaria de un operario, sino que permiten apreciar la evolución del caudal dentro del intervalo de 24 horas.

El modelo clásico funciona con un flotador que, después de disminuir la amplitud de sus oscilaciones mediante unos engranajes, hace subir y bajar una plumilla sobre un tambor giratorio.

Existen diversos tipos en que algún dispositivo colocado en el fondo mide la presión y la traduce en altura de columna de agua sobre él. Los equipos más modernos almacenan los datos digitalmente, para después pasarlos a un ordenador.

Será necesario realizar numerosos aforos directos para establecer la relación entre niveles y caudales, para después sólo con la altura deducir el caudal. Esta relación hay que actualizarla periódicamente ya que la sección del cuace puede sufrir variaciones por erosión o deposición.

No en todos los puntos de un cauce el caudal es función de la altura. Puede ser función de la altura y la pendiente del agua. A veces es necesario instalar una presa o barrera para conseguir que sea sólo función de la altura.



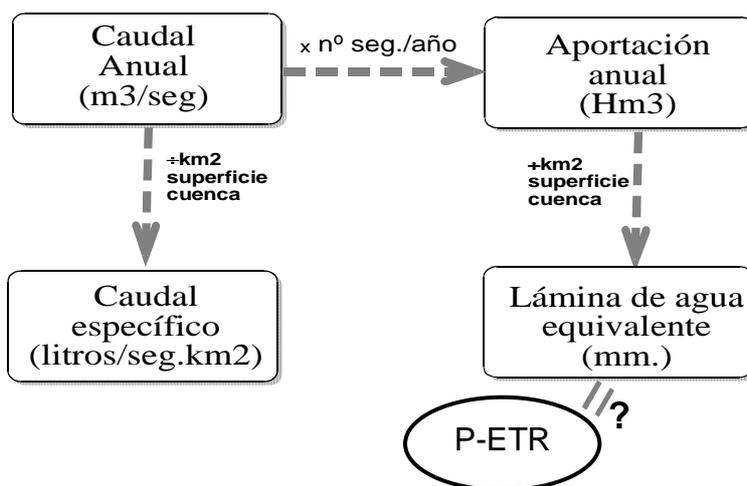
Si se requiere más precisión en la estimación del caudal a partir de la altura del agua, se instala, si es posible, un vertedero en V

## Presentación de los datos de aforos

Estos datos pueden presentarse como:

- ◆ **Caudales** ( $m^3/seg$ ,  $litros/seg$ ), que, aunque se trata de un dato instantáneo, pueden referirse al valor medio de distintos periodos de tiempo:
  - **Caudales diarios.** Pueden corresponder a la lectura diaria de una escala limnimétrica o corresponder a la ordenada media del gráfico diario de un limnógrafo.
  - **Caudales mensuales, mensuales medios.** Para un año concreto es la media de todos los días de ese mes, para una serie de años se refiere a la media de todos los Octubres, Noviembre, etc. de la serie estudiada.
  - **Caudal anual, anual medio (módulo).** Para un año concreto es la media de todos los días de ese año, para una serie de años se refiere a la media de todos los años de la serie considerada.

- ◆ **Aportación**, normalmente referida a un año, **aportación anual**, aunque a veces la referimos a un mes, **aportación mensual**. Es el volumen de agua aportado por el cauce en el punto considerado durante un año o un mes ( $Hm^3$ ).



- ◆ **Caudal específico:** Caudal por unidad de superficie. Representa el caudal aportado por cada  $km^2$  de cuenca. Se calcula dividiendo el caudal (normalmente el caudal medio anual por la superficie de la cuenca o subcuenca considerada. ( $litros/seg.km^2$ ).

Nos permite comparar el caudal de diversas cuencas, siendo sus superficies distintas. Las áreas de montaña proporcionan más de 20  $litros/seg.km^2$ , mientras que, en las partes bajas de la misma cuenca se generan solamente 4 ó 5  $litros/seg.km^2$

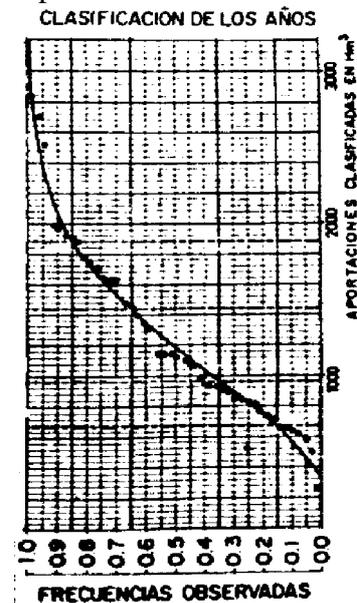
- ◆ **Lámina de agua equivalente.** Es el espesor de la lámina de agua que se obtendría repartiendo sobre toda la cuenca el volumen de la aportación anual (Unidades:  $mm$ . o  $metros$ ). Se obtiene dividiendo al aportación anual por la superficie de la cuenca. Es útil especialmente cuando queremos comparar la escorrentía con las precipitaciones.

## Tratamiento estadístico de los datos de aforos

Supongamos que disponemos de  $n$  datos de caudales. Es deseable que sean más de 20, y es frecuente disponer de series históricas correspondientes a 30 ó 40 años.

El tratamiento estadístico más común está encaminado a evaluar la probabilidad de que se presente en el futuro un caudal mayor o menor que un determinado valor, o (la operación inversa) evaluar qué caudal se superará un determinado % de los años, para tener presente la

probabilidad de que se produzcan crecidas o estiajes de efectos no deseados. Por ejemplo: ¿Qué probabilidad hay de que la aportación anual del Tormes en Salamanca supere los 900 Hm<sup>3</sup>? ¿Qué aportación se superará el 10% de los años? ¿Qué caudal medio mensual superará el 75% de los meses de Octubre?



Hay que ordenar los datos disponibles (42 aportaciones anuales, 36 caudales mensuales de 36 meses de Octubre, etc..) de menor a mayor, olvidando su orden cronológico, y calcular para cada uno de ellos la probabilidad de que el caudal o aportación alcance ese valor. Así, si son 42 datos, la probabilidad de que se alcance el mayor será 1/42, la probabilidad de que se alcance o supere el 2º será de 2/42, y así sucesivamente.<sup>(\*)</sup>

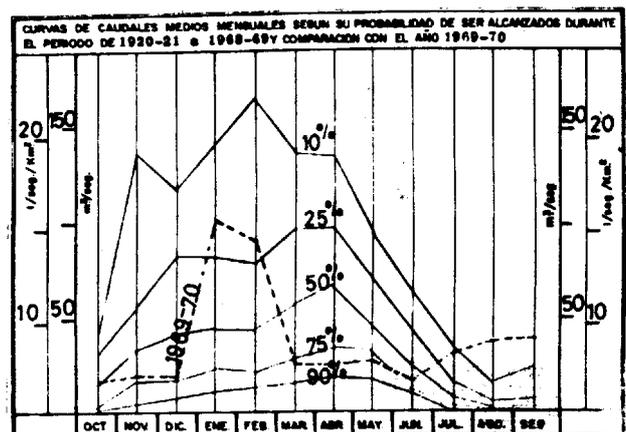
Si representamos en un gráfico en un eje los datos de menor a mayor, y en el otro las probabilidades así calculadas obtendremos una curva que nos permitirá inferir gráficamente las cuestiones planteadas más arriba.

Esto es sólo aproximado, para más exactitud hay que realizar el mismo proceso, pero ajustando los datos a una ley estadística. Los datos anuales suelen ajustarse a la ley normal o de Gauss, mientras que los datos extremos (los caudales máximos o mínimos de una serie de años) suelen ajustarse a la ley de

Gumbel.

Realizando un ajuste de este tipo para los datos de Octubre, los de Noviembre, etc. y calculando qué caudales pueden ser superados el 10%, 25%,... de los años podemos representar un gráfico como éste<sup>1</sup>:

En cualquier caso, la probabilidad de que se alcance un determinado valor es el inverso de su **periodo de retorno**. Por ejemplo, si la probabilidad de que se alcance o supere un determinado caudal es del 5%, quiere decir que el 5% de los años el caudal será igual o mayor, el periodo de retorno de dicho caudal será de 20 años. Es decir, que si el caudal supera ese valor 5 años de cada 100, eso es igual que uno de cada 20 ( $1/20=5/100$ ),



<sup>(\*)</sup> En realidad se divide por  $(n+1)$ , ya que dividiendo por  $n$ , al llegar al último, serían, por ejemplo 42/42 lo que hace que la probabilidad de que se alcance el caudal más pequeño es 1 (certeza absoluta). Eso es cierto para la muestra de 42 datos, pero en los años futuros puede presentarse uno menor.

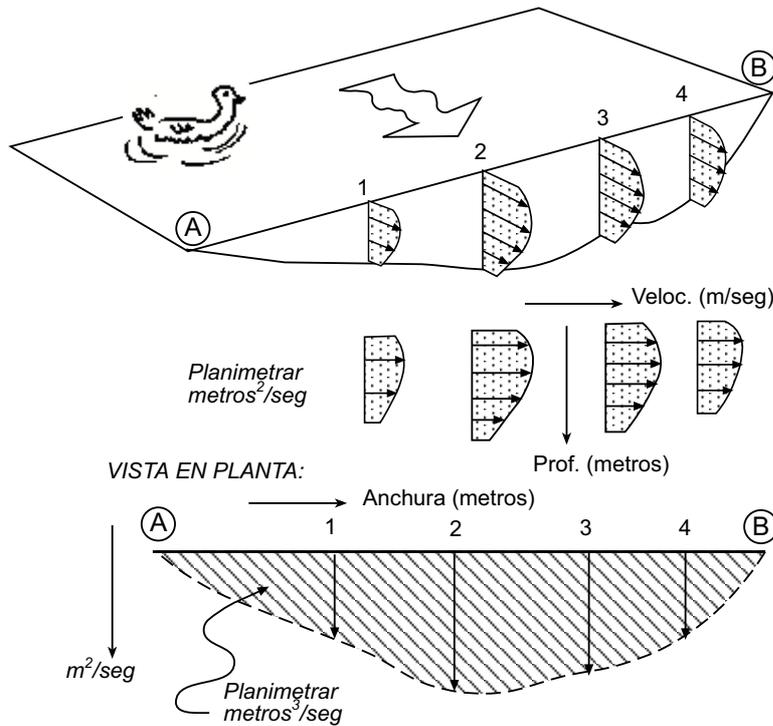
Por otra parte, el cálculo  $1/42$ ,  $2/42$ , etc... en realidad son las *frecuencias*, no *probabilidades*. Hablamos de *frecuencias* si nos referimos a la *muestra* (en este ejemplo, 42 años), y de *probabilidad* si nos referimos a la *población* (en este caso: todos los años pasados y futuros)

<sup>1</sup> Estas dos figuras pertenecen a los antiguos "Anuarios de Aforos" que editaba anualmente el Ministerio de Obras Públicas

## Apéndice

### Elaboración de los datos en un aforo con molinete

El procedimiento aparentemente más lógico sería calcular la velocidad media de la sección elegida a partir de las velocidades medidas con el molinete, planimetrar la sección, y calcular el caudal mediante el producto velocidad x sección.



En la práctica no suele hacerse así, sino por el siguiente procedimiento:

1º) Se dibujan a escala los perfiles de corriente correspondientes a cada vertical donde se midió con el molinete. Se planimetra cada uno de los perfiles. Si en horizontal están las velocidades en m/seg y en vertical la profundidad en metros, la superficie planimetrada estará en  $m^2/seg$

2º) Se dibuja una vista en planta del cauce, en abscisas la anchura del mismo, con los puntos exactos donde se midió, y en ordenadas los vectores en  $m^2/seg$  correspondientes a la planimetría del punto anterior.

Se traza la envolvente de todos estos vectores, planimetrando de nuevo. Esta planimetría, convertida a la escala del gráfico ya es el caudal (en horizontal la anchura en metros, en vertical  $m^2/seg$ , el producto en  $m^3/seg$ )