

# MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS EMISORAS DEBIDO A LA INSERCIÓN DE GOTEROS

Pinilla Herrero, I.<sup>1</sup>  
Ramírez López, J.<sup>2</sup> (P)  
Zazo Salinero, T.<sup>3</sup>

El objeto de este trabajo es el estudio de diversas metodologías para el cálculo pérdidas de carga en tuberías debidas a la inserción de emisores. Este dato es fundamental para diseñar correctamente una red de riego, y sin embargo, es habitual que el proyectista trabaje con un valor genérico para cualquier tipo de tuberías emisoras. Para tratar de dar solución a este problema se han llevado a cabo ensayos, en diferentes modelos de distintos fabricantes de tuberías emisoras, para así discriminar el método que mejor modelice las pérdidas de carga reales que se producen.

Para ello se parte de dos tipos de muestras –una de ellas modificada con sus emisores obturados y otra sin modificar -de siete modelos distintos de tuberías emisoras, con emisores tanto compensantes como no compensantes. En las muestras modificadas se ensaya un protocolo propuesto por la American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE), y otro que considera parte de las pérdidas de carga, como pérdidas en puntos singulares. En las muestras no modificadas se prueba una variante de este último tipo de ensayo.

Finalmente, con estos resultados se justifica la necesidad de establecer las pérdidas de carga en cada modelo de tubería, y se fija el tipo y las condiciones de ensayo más aconsejables para este fin.

The purpose of this project is to investigate and compare different methods to reckon the pressure drop in polyethylene pipes caused by the insertion of emitters. To make so, we have carry out different essays, on different models of emitting pipes, just to inquire which is the one that best correspond to real behaviour.

To make that, we begin with two samples –one modified with sealed emitters and another without any change- out of seven different models of pipe emitters, with both compensating and non-compensating. We test a protocol proposed by the American Society of Agricultural and Biological Engineers on the modified specimens, and another one that considers a part of the pressure drop, as local head looses due to the insertion of emitters in the emitting pipe. It is also tested a variant of this last kind of test on the unchanged specimens.

Finally, these results justify the need to set the pressure drop of each pipe emitter model, and help to advise the sort of test, and its conditions, to achieve this aim.

---

<sup>1,2,3</sup> Ingeniero Agrónomo, Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER)

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El objeto de este trabajo es establecer un método sencillo y fiable para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías emisoras (TE en lo sucesivo).

Este es un valor fundamental a la hora de diseñar una red de riego que implique la instalación de goteros, ya que la presión que llega a cada emisor, determina el caudal que evacua lo que es fundamental para aplicar correctamente los riegos. En ocasiones se utiliza un coeficiente mayorante equivalente al 10% para tener en cuenta la inserción de goteros, sin embargo en este trabajo se puede ver que hay una gran diferencia de unas tuberías a otras, lo que indica que sin un estudio exhaustivo de las pérdidas que provocan estos emisores, se cometen errores inaceptables. Esto sucede porque en una tubería emisora, la mayor parte de las pérdidas, se deben a la morfología, funcionamiento y modo de inserción de los emisores, lo que cambia totalmente de una tubería a otra, aunque tengan el mismo diámetro y estén fabricadas del mismo material.

Los métodos propuestos son al menos en parte empíricos, frente a los puramente teóricos, que no se han considerado. En primer lugar, se comparan tuberías con los emisores obturados, y tuberías ensayadas en las mismas condiciones en que serían utilizadas en campo. Se pretende averiguar si es posible obtener resultados fiables a través del ensayo de TE obturadas. Ensayar este material presenta diversas ventajas que se mencionarán más adelante.

Adicionalmente, dentro de las TE obturadas, se han ensayado dos métodos diferentes. El primero, es el método propuesto por la American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE en lo sucesivo), cuyo objetivo es llegar a un valor de *Pérdidas de carga/100m* ( $H_f/100m$  en lo sucesivo) de longitud de la tubería emisora.

Esto se logra mediante un supuesto: la caída de presión que se produce en la cabecera de la tubería al reducir la longitud de la tubería, es proporcional a esa misma reducción. De esta forma, ensayamos en primer lugar una tubería emisora de 90 m, de un determinado modelo, para, a continuación, ensayar otra muestra de tan sólo 6 m del mismo modelo, ambos ensayos al mismo caudal. El motivo de haber escogido este método es su rapidez.

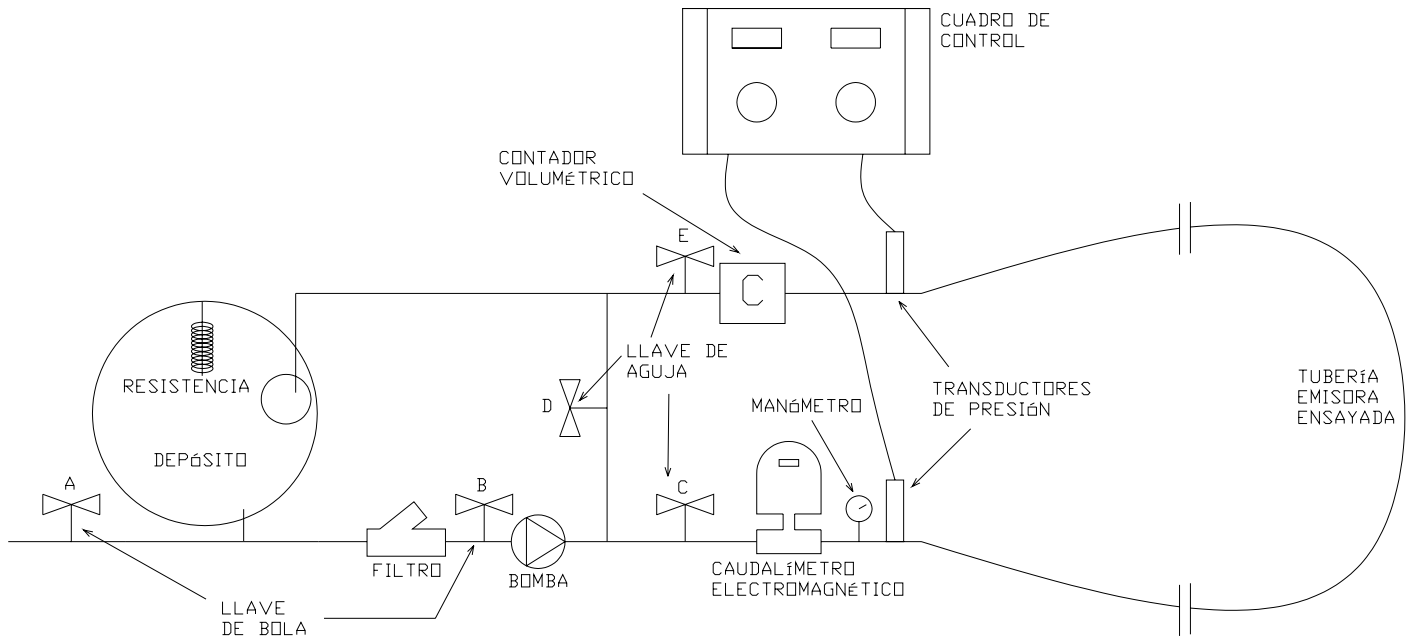
El segundo método que se ha ensayado, se basa en diferentes estudios previos sobre el tema, y su base teórica es la consideración de las pérdidas de carga totales, como la suma de las pérdidas que se producen por el paso del agua a través de la propia tubería, más las pérdidas que se producen debido a la inserción de emisores, lo denominaremos método PPS en lo sucesivo.

Lo que queremos ofrecer es fiabilidad y sencillez en la determinación de las pérdidas de carga en tuberías emisoras, que permita evitar todos los problemas que conlleva la inexactitud en el diseño de un sistema de riego localizado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar se describirá el banco de ensayo, sus componentes, y, en general, todos los materiales utilizados en este trabajo.

El banco de ensayo:



Se describen brevemente los elementos del banco:

**El Depósito:** Depósito fabricado en PVC con capacidad de  $0,3 \text{ m}^3$ . Como se ve es a la vez fuente y sumidero para la recirculación del agua.

**Resistencia eléctrica:** Suficiente para calentar el agua del depósito rápidamente. Mantiene el agua a  $23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Válvulas de control:** Dos válvulas de bola DN25 antes de la bomba, A y B. Una para el vaciado total del depósito, otra entre la bomba y el filtro para abrir o cerrar el paso de agua al banco de ensayo. Después tres válvulas de aguja, C, D y E. Una de ellas –C– regula el paso hacia el inicio de la TE, otra controla el retorno al depósito –D–, y la última –E– sirve para estrangular el paso de agua, y de esta forma controlar la presión en la instalación.

**Filtro:** Filtro de malla de  $100 \text{ }\mu\text{m}$

**Bomba de alimentación:** Se utiliza una bomba trifásica de  $0,75 \text{ KW}$  de potencia, capaz de suministrar caudales de  $20\text{-}100 \text{ l/m}$  ( $0,33\text{-}1,67 \text{ dm}^3/\text{s}$ ), y presiones de hasta  $350 \text{ KPa}$ , considerados suficientes para los ensayos a realizar.

**Aparatos de medida del caudal:** Se dispone de un caudalímetro electromagnético antes de la TE, de  $\pm 0,1 \text{ l/h}$  ( $2,7 \times 10^{-5} \text{ dm}^3/\text{s}$ ) de resolución, y de un contador volumétrico a la salida de la misma, con resolución de  $\pm 0,1 \text{ dm}^3$ .

**Aparatos de lectura de la presión:** Se dispone de un manómetro de glicerina de  $0\text{-}600 \text{ KPa}$  con resolución  $\pm 20 \text{ KPa}$ , que se utiliza para contrastar la medida de uno de los transductores. También se dispone de dos transductores de presión con rangos de medida de  $0\text{-}600 \text{ KPa}$  y

resolución +/- 1 KPa, situados inmediatamente aguas abajo y aguas arriba de la TE. Se usarán para obtener el valor de las pérdidas de carga a lo largo del ramal.

*Cuadro de control:* Al que van conectados a dos visores, los dos transductores de presión. Tiene dos mandos, de posición “encendido-apagado” que dan servicio a la bomba y a la resistencia. También tiene un interruptor general que enciende y apaga el cuadro de control.

*Termómetro infrarrojo:* Se utiliza un aparato para medir en cada momento la temperatura del agua. Esto nos permite mantener un control sobre la temperatura del agua, para que se mantenga permanentemente en los 23 +/- 3 ° C.

## TUBERÍAS ENSAYADAS

MODELO	DIÁMETRO EXTERIOR (mm)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	CAUDAL (l/h)	SEPARACIÓN ENTRE GOTEROS (cm)	TIPO	P de trabajo o de compensación (mca)
1	17,5	15,5	3,9	30	Autocompen.	Entre 10 y 40
2	16	13,8	4	30	Turbulento	Entre 8 y 15
3	20	17,5	4	30	Autocompen.	Entre 5 y 35
4	16	14	4	30	Autocompen.	Entre 10 y 30
5	20	17,5	3,5	30	Autocompen.	Entre 8 y 43
6	16	13,7	3,5	30	Autocompen.	Entre 8 y 43
7	20x1,15	17,6	4	30	Turbulento	Entre 8 y 20

## PROTOCOLOS DE ENSAYO

### Condiciones generales de ensayo:

- Todos los ensayos se realizarán con una Tª del agua de 23 +/- 3 ° C.
- El ensayo no comenzará hasta que el caudal sea estable (Variación < 5%).
- Se permitirá una desviación máxima respecto al punto de ensayo teórico del 5%.
- La pendiente del recinto donde se efectúen los ensayos será < 0,01%
- El radio de curvatura mínimo -para evitar que se produzcan pérdidas de carga extras que puedan afectar al resultado- será de 0,5 m.
- Los tramos de tubería ensayados varían entre 25 y 50 m en el caso de tuberías no obturadas, y 90 m en el caso de tuberías obturadas.
- El tiempo de ensayo será de 2 minutos (120 segundos) para cada caudal.

### En TE no obturadas:

En este primer ensayo se consideran las pérdidas de carga totales, como suma de las que se producen por el paso del agua a través de la propia tubería, más las que se producen debido a la presencia de emisores en la misma.

$$hf = hft + hfps(K)$$

Para el cálculo de las pérdidas que se producen a lo largo de la tubería (*hft*), nos basamos en la formulación propuesta por Blassius para el cálculo de pérdidas de cargas en tramos uniformes.

$$Hft = 0,0246 \cdot v^{0,25} \cdot D^{-4,75} \cdot Q_0^{1,75} \cdot L \cdot F_{tu}$$

Y para hallar las pérdidas de carga en puntos singulares (*hfps*), consideramos las mismas como el producto de K, por un factor cinético:

$$Hf_{ps} = K \cdot N \cdot F_k \cdot \left( \frac{4 \cdot Q_o}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g}$$

Por lo tanto,

$$hf = 0,0246 \cdot F_{iu} \cdot \nu^{0,25} \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4,75} \cdot L + K \cdot F_K \cdot N \cdot \left( \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g}$$

Donde:

$\nu$ : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$Q$ : Es el caudal de ensayo (m<sup>3</sup>/s)

$D$ : Es el diámetro (m)

$L$ : Es la longitud de la TE (m)

$K$ : Es el coeficiente de pérdidas de carga en puntos singulares (adimensional)

$N$ : Es el número de emisores

$g$ : Es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$F_i$ : Es el factor de Christiansen, que considera la disminución progresiva del caudal a lo largo de la tubería.

Despejando  $K$ :

$$K = \frac{hf - 0,0246 \cdot F_1 \cdot \nu^{0,25} \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4,75} \cdot L}{N \cdot F_2 \cdot \left( \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g}}$$

Para ello, en primer lugar se calcula el caudal máximo y mínimo a ensayar. La única restricción en este punto es que nos aseguremos que la presión que llega a todos los goteros está dentro del intervalo de trabajo, o de auto-compensación, en su caso.

A continuación se calculan 10 puntos de caudal uniformemente distribuidos entre el  $Q_{\max}$  y el  $Q_{\min}$ . A lo largo del ensayo se verifica, con ayuda del contador "C", si el caudal evacuado por los emisores es estable (se ha decidido permitir un +/- 7 % de variación en el caudal, a lo largo del intervalo de presiones en que es autocompensante). Obtenemos un valor de  $K$ , para cada caudal, con ayuda de la formulación antes descrita. Finalmente calculamos el  $K$  medio para cada muestra.

Para finalizar se vuelven a recalcular las pérdidas de carga para cada caudal, utilizando el valor medio de  $K$  que acabamos de obtener. La diferencia con respecto al valor real de pérdidas es representativa de la posible falta de exactitud del método.

Se hace un mínimo de dos repeticiones de cada muestra.

### En TE obturadas

Se lleva a cabo en primer lugar, el ensayo descrito anteriormente, con el objeto de obtener un valor de  $K$ ; con la salvedad de que el cálculo no se ve afectado por el factor de Christiansen. Esto es debido a que tal coeficiente representa la disminución progresiva del caudal a lo largo del ramal, por lo tanto es inaplicable por estar los emisores obturados.

$$K = \frac{hf - 0,0246 \cdot v^{0,25} \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4,75} \cdot L}{N \cdot \left( \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g}}$$

También existe una segunda diferencia, la presión no es un punto clave, ya que los emisores no están funcionando, y eso facilita la regulación del caudal. En los demás aspectos el protocolo de ensayo es el mismo.

Adicionalmente, se realiza otro ensayo, el propuesto por ASAE, con el que se pretende obtener un valor de Hf/100m de TE.

Este ensayo se realiza sobre dos muestras de la misma TE, una de 90 m de longitud, y otra de 6 metros. En primer lugar se instala la tubería de 90 m, y se ensaya al caudal que corresponda a una velocidad de 0,84 m/s (tal y como se describe en la metodología). Después, sin variar la posición de la válvula D (que hace las veces de sostenedora de presión), cambiamos la muestra, y colocamos la de 6 metros de longitud, y se ensaya de nuevo al caudal correspondiente a una velocidad de 0,84 m/s.

$$Q_t = 0,0395808 \cdot D_{int}^2, \text{ con } Q \text{ en l/min y } D \text{ en mm.}$$

El sentido de no modificar la válvula sostenedora de presión, es que cada caudal quede asociado a una sola presión en cabecera, y no a una infinidad de ellas, que es lo que sucedería en caso de maniobrar con ésta válvula además de con la "D".

Por proporcionalidad, obtenemos el valor de Hf/100m:

$$\frac{Hf}{100m} = \frac{P_{90} - P_6}{90 - 6}$$

Con este valor y la longitud que hayamos ensayado tenemos las pérdidas totales de la tubería, le restamos las pérdidas sólo debidas a la propia tubería que hemos calculado en el anterior método con la ecuación de Blassius, y tenemos el valor de pérdidas en puntos singulares, del que se extrae un valor de  $K$ , comparable al obtenido con los otros métodos.

$$Hf_{ps} = K \cdot N \cdot F_k \cdot \left( \frac{4 \cdot Q_o}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{Hf - Hf_{tub}}{N \cdot \left( \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g}}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar se muestran los diferentes valores de K calculados para cada método y tubería:

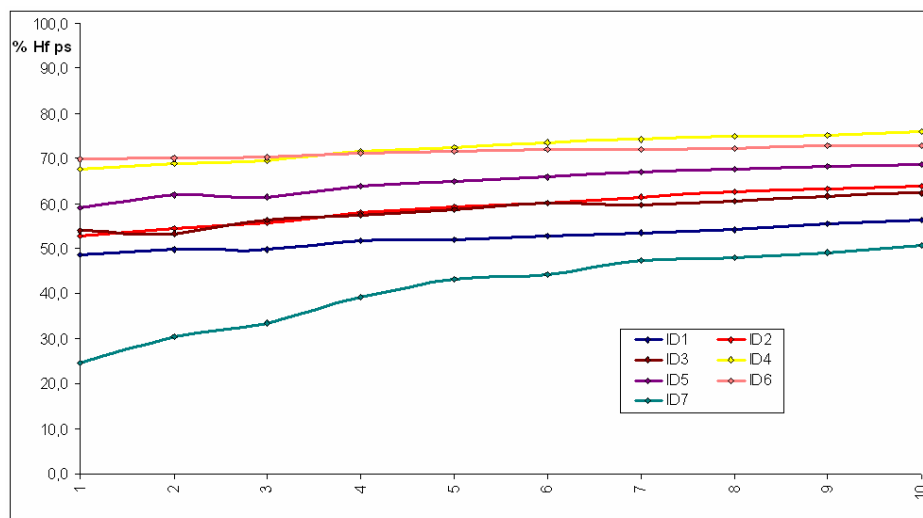
ID	VALOR DE K			DESVIACIONES K	
	No obturadas	Obturadas Pps	Obturadas Asae	Respecto a Pps	Respecto a Asae
1	0,54	0,68	0,56	25,9%	2,9%
2	0,76	0,69	0,64	-9,2%	-17,4%
3	0,59	0,53	0,48	-10,2%	-20,8%
4	1,45	1,5	1,22	3,4%	-15,3%
5	0,79	0,8	0,72	1,3%	-8,8%
6	1,5	1,6	1,15	6,7%	-21,9%
7	0,26	0,26	0,24	0,0%	-7,7%

Para calcular las desviaciones, se usa como referencia el valor obtenido en el ensayo con TE no obturadas, por ser el que se realiza en condiciones reales.

En todas las muestras excepto en la nº 1, el valor obtenido con el método Pps fue más fiable que el obtenido con el método ASAE.

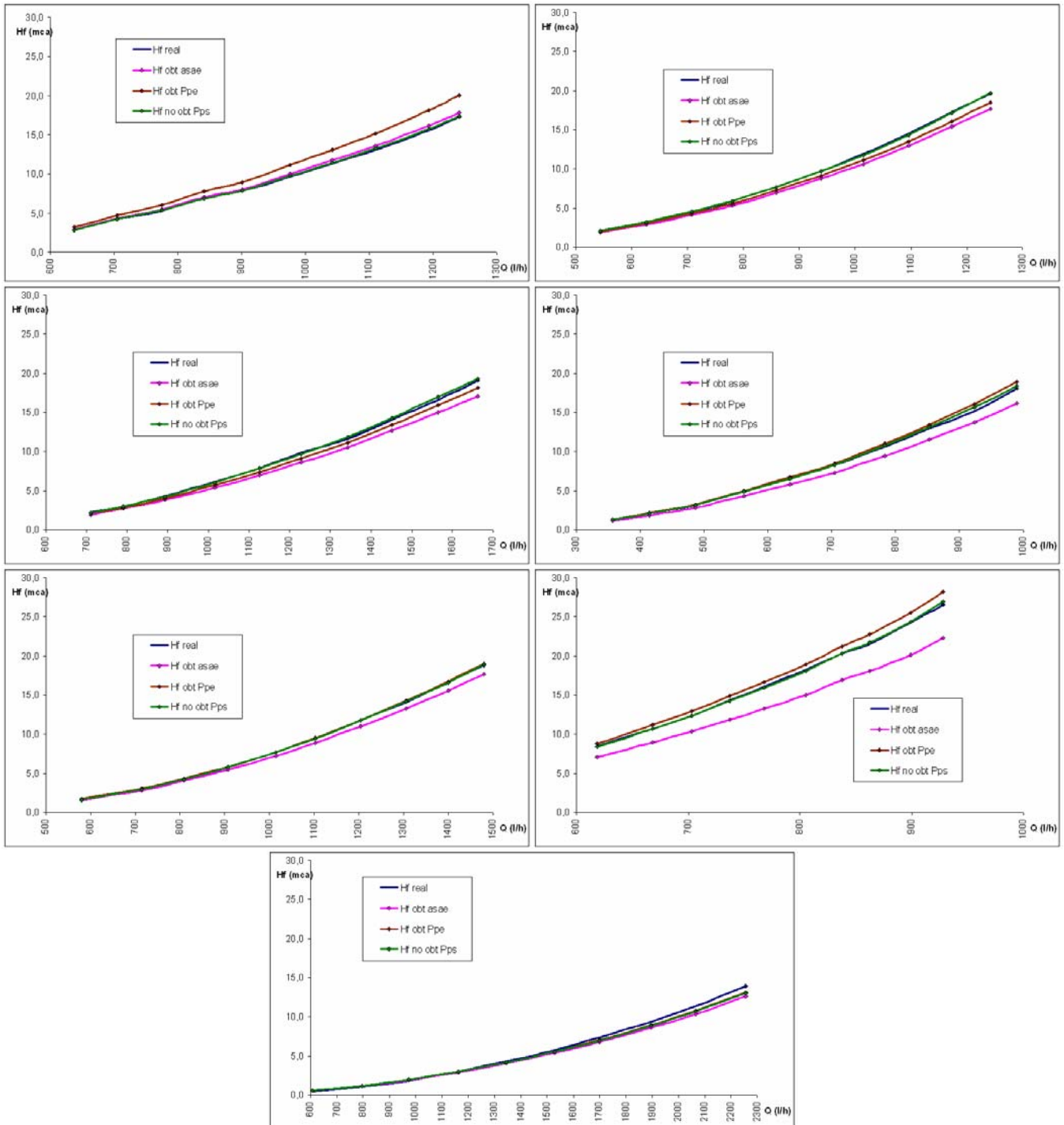
Se ha observado que para 4 de las 5 tuberías auto-compensantes, el rango de presiones de compensación, era menor del especificado por el fabricante, y el caudal evacuado no era el esperado. Siempre según nuestro criterio de un máximo del 7% de desviación respecto al caudal esperado. Este desajuste entre el caudal esperado, y el que realmente evacua puede provocar sobrerriego o déficit de riego, con el consiguiente riesgo para el cultivo.

También se ha observado algo que tiene relación con un tema que ya se ha comentado: el considerar las pérdidas en TE como un % más o menos fijo en base al total. En este gráfico está representado en el eje de abscisas el % de las pérdidas totales que se debe a la inserción de goteros, y en ordenadas el aumento genérico del caudal:



Se observa cómo en las diferentes muestras, este % es un valor muy variable, que oscila entre el 25 y el 70 % del total. Esta es la justificación de que sea necesario establecer un protocolo para poder asignar un valor individualizado a cada modelo de TE.

Hemos comparado anteriormente los diferentes valores de K obtenidos con cada método de ensayo, a continuación vamos a ver qué método de los tres modeliza mejor las pérdidas de carga reales que se producen en una TE en su funcionamiento normal:



Se puede ver en los siete gráficos que con los tres métodos se obtienen resultados bastante similares, y en especial con los dos PPS.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

Como primera conclusión a este trabajo, queremos remarcar que la magnitud de las pérdidas que provoca la inserción de emisores es enorme, y en ocasiones supone más de la mitad de las pérdidas totales. Por lo tanto es un factor a tener muy en cuenta a la hora de diseñar un riego.

En segundo lugar, los datos certifican la enorme diferencia que existe entre la inserción de uno u otro emisor en relación a las pérdidas que producen. Esto justifica sobradamente que se haga un estudio individualizado para cada modelo de TE. Para facilitar esta labor analizamos los métodos ensayados.

Observamos que el método que mejores resultados ha dado, es el que se realiza sobre las TE en su funcionamiento real. Un resultado también muy correcto, se obtiene con el mismo método PPS, aplicado a tuberías emisoras obturadas. Y algo menos exacto como se puede ver, pero sin embargo también bastante satisfactorio, resulta el método ASAE.

No obstante, la complicación que supone el tener que ensayar con tuberías emisoras no obturadas, quizás no se ve justificada por la escasa exactitud que ganamos con respecto al mismo método en tuberías obturadas. El cual presenta varias ventajas,

- Se puede realizar en espacios cerrados, y no requiere el acondicionamiento especial para recoger el agua evacuada por los emisores.
- No es necesario mantener un control tan estricto sobre las presiones.
- Al ser las pérdidas de carga mayores, se pueden ensayar tramos más cortos de tubería, lo que facilita el manejo, y hace más laxas las condiciones para escoger el lugar del ensayo.

Por otra parte, el método ASAE sólo tiene como ventaja respecto a los otros dos, el que los ensayos son muy cortos, pero la desventaja de una menor fiabilidad (en ocasiones mucho menor) en añadidura de que cada ensayo requiere de la instalación de dos tuberías en vez de una sola, y una de ellas de 90m de longitud, con la carga de trabajo que esto conlleva.

En resumen, recomendamos utilizar el método PPS en tuberías obturadas, por ser un método bastante fiable, y moderadamente sencillo de llevar a la práctica.

## BIBLIOGRAFÍA

*“Trabajo fin de carrera: Determinación de las pérdidas de carga localizadas en ramales de riego por goteo. Proyecto de norma técnica”* Cristina Cristóbal Gómez

*“Collapsible Emitting Hose (Drip Tape) – Specifications and Performance Testing”* ANSI/ANSAE S553 MAR01

*“Riego Localizado”* J. Rodríguez López et al. Ed Mundi-prensa.

*“Riego por Goteo y Microaspersión para Árboles, Vides y Cultivos anuales”* Irrigation Training & Research Center. California Polytechnic State University.

*“Riego Localizado”* Jaime Arviza Valverde. Editorial Universidad Politécnica de Valencia

*“Ingeniería Hidráulica”* Teodoro Montalvo López. Editorial Vj