

# Diseño y alternativas en la instalación de inyectores Venturi en riego localizado<sup>1</sup>

## Design and installation alternatives of Venturi injectors in drip irrigation

Juan Manzano<sup>2\*</sup>, Carmen Virginia Palau<sup>2</sup>, Benito Moreira de Azevedo<sup>3</sup>, Guilherme Vieira do Bomfim<sup>3</sup> e Denise Vieira Vasconcelos<sup>3</sup>

**RESUMEN** - En la *Universitat Politècnica de València*, Valencia, España (39°29' N; 0°23' W; 20 m), ha sido estudiado el funcionamiento de cuatro prototipos de inyector Venturi y tres formas de instalación distintas. El funcionamiento se ha analizado bajo diversos parámetros, como pérdidas de carga, relación de caudales y rendimiento. Las formas de instalación analizadas han sido: sin inyección y con inyección y presiones negativas o positivas en la garganta. Las presiones se establecieron entre 10 y 40 m.c.a. A partir de los datos experimentales han sido procesados utilizando técnicas de regresión múltiple y análisis de la varianza. Con ellas, fue posible, a través de la integración de geometrías en función de los diámetros, caudales y presiones, obtener expresiones para prever la pérdida de carga o el caudal inyectado. Se pone de manifiesto que la relación de caudales y el rendimiento son mayores cuanto mayor es el diámetro de la aspiración y empeoran al reducirse el diámetro de la garganta, siendo estas las dimensiones que más condicionan la inyección. También, puede afirmarse que la pérdida de carga, para un mismo caudal inyectado, es inferior si la operación se realiza con presiones positivas que con presiones negativas. La relación de caudales o el rendimiento también proporcionan valores más elevados bajo esta forma de instalación propuesta.

**Palabras-clave:** Riego presurizado. Quimigación. Fertirrigación.

**ABSTRACT** - The performance and installation alternatives of four Venturi injector prototypes were studied at *Universitat Politècnica de València*, Valencia, Spain (39°29' N; 0°23' W; 20 m). This device performance was studied under several parameters such as head loss, relation of flows and injection efficiency. The installation configurations analyzed were: without the injection of nutrients solution and with the injection either having negative or positive pressure at the Venturi throat. The inlet pressures were established between 10 and 40 m.w.c. The experimental data has been processed using multiple stepwise regression techniques and analysis of variance (ANOVA). Moreover, geometry integration versus diameters, flows and pressures is used to obtain some equations for predicting the head loss and injected flow. The results of the present study showed that the relation between flows and injection efficiency were better when the diameter of inlet nutrient line increases and become worse when decreases the diameter of the Venturi throat. Accordingly, these dimensions become very important in the design prototype and installation configuration. Furthermore, after the analysis of laboratory experiments it can be concluded that head losses, at the same injected flow, were lower if the injection was carried out with positive pressures at the throat than in the case of negative pressures. Also in this case, the relationship between flow rates and injection efficiency led to a good performance of the proposed installation.

**Key words:** Pressurized irrigation. Chemigation. Fertigation.

DOI: 10.5935/1806-6690.20150008

\*Autor para correspondência

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 22/03/2013; aprovado em 09/01/2015

Extraído de la Tesis del primer autor, con el apoyo financiero de la *Universitat Politècnica de València* y del Centro Valenciano de Estudios del Riego

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Rural/Agroalimentaria/DIRA, *Universitat Politècnica de València/UPV*, Valencia, Valencia, España, juamanju@agf.upv.es, virpaes@agf.upv.es

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Agrícola/DENA, Centro de Ciências Agrárias/CCA, Universidade Federal do Ceará-UFC, Rua Dom José Lourenço, Campus do Pici, Bloco 804, Caixa Postal, 12.168, Fortaleza-CE, Brasil, 60.450-760, benitoazevedo@hotmail.com, guile01@ig.com.br, denisevasconcelos@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

La inyección de productos químicos en el agua, operación conocida como quimigación (ARMINDO *et al.*, 2009), es una técnica muy extendida hoy día en los sistemas de riego a presión, tanto en los sistemas de aspersión (CUNHA, 2008; KING; WALL; TABERNA JÚNIOR, 2009) como en riego localizado (GHIDIU *et al.*, 2012; REDING; ZHU; DERKSEN, 2008), presentando ventajas importantes.

Un equipo de inyección muy utilizado para a aplicación de los agroquímicos es el inyector tipo Venturi (PERALTA; SCHLAM; TZEC, 2010). La *International Organization for Standardization* (ISO) define el “inyector Venturi de presión diferencial” como un dispositivo cuyo funcionamiento consiste en introducir una corriente de agua de riego a presión a través de un conducto, incrementando la velocidad y reduciendo la presión, para arrastrar un líquido aditivo a través de una tubería de succión y mezclando el aditivo con la corriente de agua de riego e incorporarlo al exterior del elemento (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2002) (Figura 1).

$Q_1$ : caudal de entrada;  $q$ : caudal inyectado;  $Q_3$ : caudal de salida;  $D_1$ : diámetro de la tobera;  $d$ : diámetro de aspiración;  $D_2$ : diámetro de la garganta;  $D_3$ : diámetro del difusor;  $L_1$ : longitud de la tobera;  $L_g$ : longitud de la garganta;  $L_d$ : longitud de aspiración;  $L_4$ : longitud del difusor;  $\alpha_1$ : ángulo de la tobera;  $\alpha_2$ : ángulo del difusor. Secciones: 0: lamina libre solución de inyección; 1: entrada Venturi; 2: garganta; 3: salida Venturi; 4: salida aspiración; 5: entrada aspiración.

Es un sistema robusto y el más barato, sin partes móviles, que no requiere aporte externo de energía

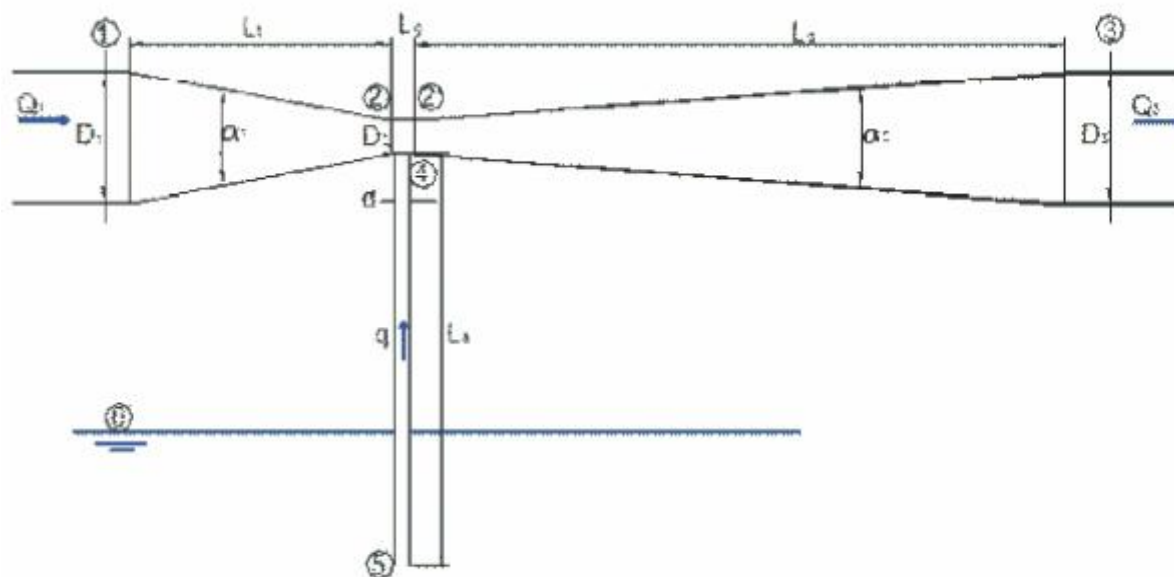
eléctrica (SANTOS *et al.*, 2012). Sin embargo, presenta algunas desventajas, principalmente, las altas pérdidas de carga (SUN; NIU, 2012). Para que empiece a funcionar correctamente es necesario crear una diferencia de presión mínima de 10 m.c.a. Superior, en algunos casos, al 50% de la presión disponible y nunca inferior a unos 30% de la presión de entrada (ARVIZA, 2001).

Es posible atenuar las pérdidas de carga instalando el inyector sobre el nivel de aspiración, ahorrando energía en el sistema de inyección (BORTOLINI *et al.*, 2010). Velocidades inferiores en la garganta podrían disminuir la erosión en lo equipo y el caudal del emisor podría ser más uniforme durante la fertilización y postriego (MANZANO-JUÁREZ, 2008).

La definición del inyector Venturi (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2002) no precisa las geometrías, como tampoco fija otras dimensiones más allá de los diámetros nominales de conexión. La información comercial consultada de diferentes fabricantes no incluye los valores angulares ni los diámetros interiores. El rotámetro, que acompaña algunos modelos, se emplea para controlar el caudal inyectado, sin embargo es un dispositivo poco preciso y de regulación difícil (MONTALVO-LÓPEZ, 2007).

En cualquier caso, la información técnico-comercial suele ser pobre y su interpretación confusa. Parámetros hidráulicos como pérdidas de carga totales, relación de caudales y rendimientos también son escasos, estando disponibles ocasionalmente en estudios científicos (BORTOLINI *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2012).

**Figura 1** - Esquema típico de inyector Venturi, Valencia, España, 2008



El objetivo planteado es estudiar cuatro prototipos de inyector instalados en serie con diferentes dimensiones en sus secciones principales, registrando datos de funcionamiento para cada uno, en tres situaciones distintas: sin inyección y con inyección, estableciendo en este caso presiones negativas y positivas en la garganta. También quiso comprobarse qué tipo de instalación (inferior o superior) es más favorable desde un punto de vista hidráulico.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El banco de ensayos está situado en el laboratorio de Hidráulica y Riego Localizado del Departamento de Ingeniería

Rural y Agroalimentaria de la *Universitat Politècnica de València*, Valencia, España (39°29' N, 0°23' W e 20 m).

Se han ensayado cuatro prototipos de Venturi instalados en serie (en línea con la tubería principal) con variaciones en la geometría (Tabla 1).

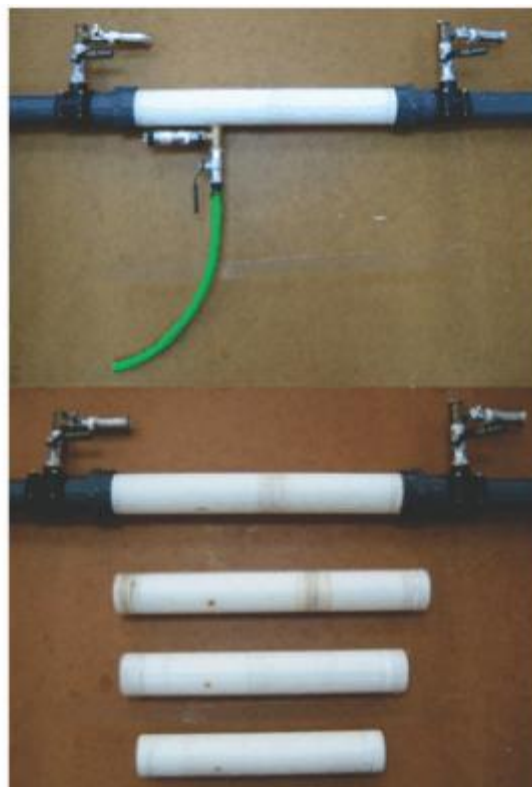
La Figura 2 muestra las dimensiones e imágenes de los prototipos, respectivamente. Para evaluación de los prototipos, se obtuvieron las variables: presión en la entrada ( $P_1$ ), en la garganta ( $P_2$ ) y en la salida ( $P_3$ ) del Venturi; presión diferencial (DP): entre la entrada y la garganta ( $P_1 - P_2$ ); caudal principal ( $Q_1$ ): caudal de entrada en la tobera del inyector; caudal de inyección ( $q$ ): caudal inyectado en la garganta por la tubería de aspiración; relación de inyección

**Tabla 1** - Dimensiones de los prototipos de Venturis ensayados, Valencia, España, 2008

Prototipo	DN (mm)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$\beta$	d (mm)	$\alpha_1$ (°)	$\alpha_2$ (°)	Código (DN- $\beta$ -d)
V1	63	57	17,1	0,3	6	21	7	63-0,3-6
V2	63	57	17,1	0,3	16	21	7	63-0,3-16
V3	50	45,2	17,1	0,4	6	21	7	50-0,38-6
V4	50	45,2	9	0,2	6	21	7	50-0,2-6

DN: diámetro nominal de la tubería en que se inserta el inyector;  $D_1$ : diámetro de la tobera;  $D_2$ : diámetro de la garganta;  $\beta$ : relación de diámetros ( $D_2/D_1$ ); d: diámetro de la tubería de aspiración;  $\alpha_1$ : ángulo de la tobera;  $\alpha_2$ : ángulo de difusor

**Figura 2** - Dimensiones (mm) e imágenes de los prototipos ensayados, Valencia, España, 2008



( $r_q$ ): entre el caudal inyectado y el entrante del inyector ( $q/Q_1$ ); pérdidas totales en el inyector ( $\Delta h_v$ ): diferencia de presión entre la garganta y la salida ( $P_1-P_3$ ); diferencia de energía ( $\Delta H_a$ ) (Bernoulli): entre la solución de inyección y la garganta del Venturi ( $Z_0-(Z_2+(P_2)/\rho g)+V^2/2g$ ); rendimiento ( $\eta$ ) del inyector ( $q/Q_1 (P_3-P_2/P_1-P_3)$ ). Las unidades utilizadas han sido: para  $P_1, P_2, P_3, DP, \Delta h_v, (P_3-P_2), \Delta H_a$  y  $Z$ , m.c.a.; para  $Q_1$ , L s<sup>-1</sup>; para  $q$ , L h<sup>-1</sup>; para  $V$ , m s<sup>-1</sup>.

Uno de los objetivos del ensayo ha sido relacionar las presiones en la entrada, aspiración y salida del inyector con el caudal principal, el caudal inyectado y las pérdidas de carga totales para cada uno de los prototipos. Entre los prototipos V1-63-0,3-6 y V2-63-0,3-16 se ha comparado el efecto del ( $d$ ). Con los prototipos V1-63-0,3-6 y V3-50-0,38-6 se ha comparado la influencia de la variación de ( $\beta$ ) para un determinado ( $D_2$ ). Entre los prototipos V3-50-0,38-6 y V4-50-0,2-6 se ha analizado la influencia de la variación de ( $\beta$ ) para un determinado ( $D_1$ ).

El ensayo completo de cada prototipo se ha desarrollado en tres fases (Figura 3). En la primera (E1), con la aspiración cerrada, se mantuvo constante la presión en la entrada del inyector ( $P_1$ ) y se incrementó progresivamente el caudal ( $Q_1$ ) hasta que se detectó la cavitación en la garganta. Se obtuvo la relación básica de pérdida de carga en los Venturis ( $DP, \Delta h_v$  y  $P_3-P_2$ ) con el caudal principal ( $Q_1$ ).

En la segunda (E2), la toma de datos se realizó de forma semejante a la fase anterior. La diferencia con la fase E1 reside en que la adquisición de datos comenzó cuando se alcanzaron presiones negativas, registrándose valores con la válvula de aspiración cerrada y abierta en cada regulación. Se obtuvo el caudal inyectado ( $q$ ) y su relación con las variables significativas: presión y caudal principal ( $P_1$  y  $Q_1$ ) y diferencia de energía entre el nivel de la lámina libre en el depósito de aspiración y la garganta y presión principal ( $\Delta H_a$  y  $P_1$ ). También se obtuvieron las pérdidas de carga en los Venturis ( $\Delta h_v$ ), en función de las variables significativas: caudal inyectado y caudal principal ( $q$  y  $Q_1$ ).

En la tercera (E3), también con la aspiración abierta, se relacionaron diferentes niveles de la superficie de aspiración, en este caso por encima del eje del inyector, con caudales y presiones. Para una presión de entrada ( $P_1$ ) regulada, la adquisición de datos comenzó a partir de una altura de agua inicial ( $z_e$ ) sobre el eje del Venturi; esta altura desciende al inyectarse caudal y se estabiliza cuando se iguala a la presión en la garganta, cesando la inyección. A continuación, con una ligera apertura de la válvula de regulación, se produce un aumento del caudal con los correspondientes incrementos de la velocidad ( $V_2$ ) y descenso de la presión en la garganta ( $P_2$ ). El descenso

de  $P_2$ , frente al nivel  $z_e$ , provoca de nuevo la entrada de líquido en el Venturi y el descenso de nivel en la columna. Los caudales inyectados fueron deducidos a partir de las variaciones de volumen en la columna de aspiración. Para cada punto de regulación el caudal de inyección se ha reducido progresivamente hasta que la presión en la garganta volvió a igualarse a  $z_e$ . En este momento, se volvió a actuar sobre la válvula de regulación para generar otro descenso. La adquisición de datos continuó mientras el nivel de agua en la columna se centró sobre el eje del inyector. Se obtuvo el caudal inyectado ( $q$ ) y su relación con la variable significativa: diferencia de energía entre el nivel en la columna y la garganta ( $\Delta H_a$ ). También se obtuvieron las pérdidas de carga en los Venturis ( $\Delta h_v$ ), en función de las variables significativas: caudal principal y caudal inyectado ( $Q_1$  y  $q$ ).

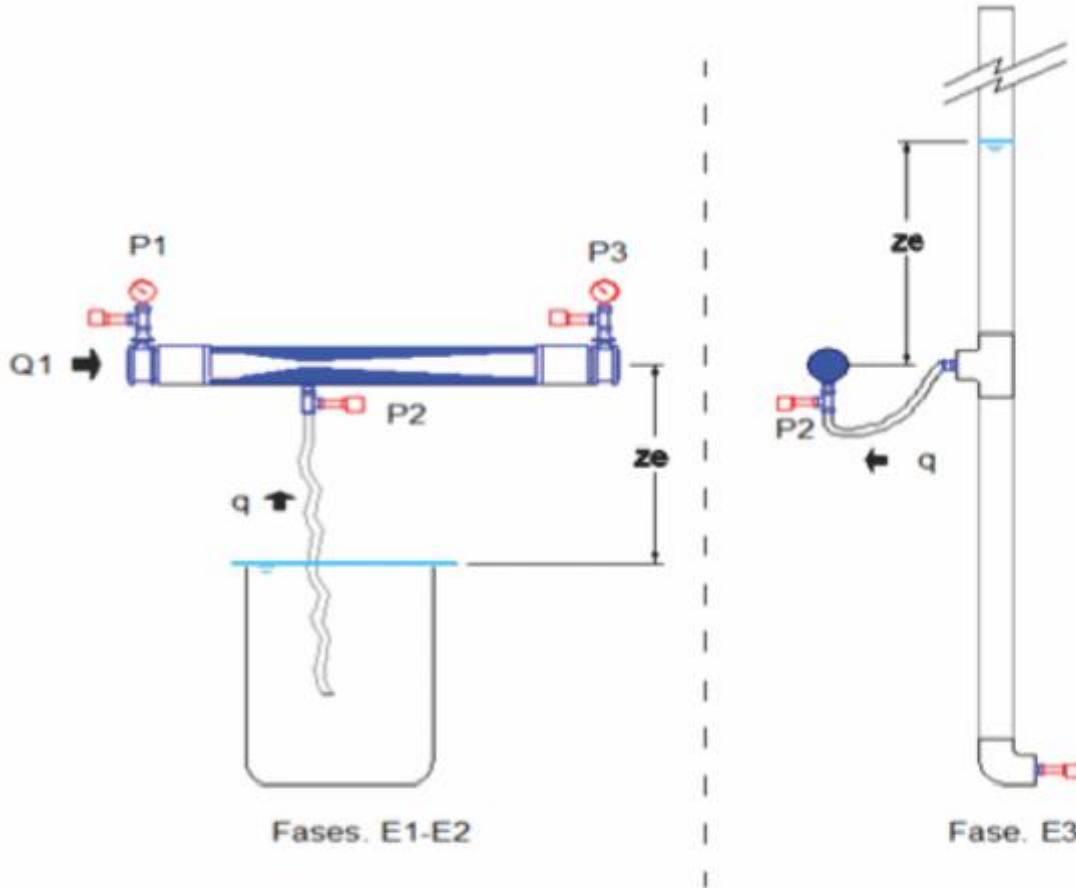
Para cada medida realizada en las tres fases del ensayo, las presiones a la entrada de los prototipos se establecieron entre 10 y 40 m.c.a. (Tabla 2), mientras que los caudales máximos fijados fueron aquellos que no produjeron cavitación en la garganta del Venturi.

La comparación del comportamiento de los inyectores en las fases E2 y E3 se realizó en forma gráfica con: pérdidas de carga ( $\Delta h_v$ ); relación de caudales ( $q/Q_1$ ); rendimientos ( $\eta$ ). Las presiones de entrada al Venturi se fijaron, en la práctica, entre 20 y 40 m.c.a.; en consecuencia, se utilizaron para estas cuatro familias de gráficas, valores de  $P_1$  de: 20; 30; 40 m.c.a., con ambos los tipos de inyección. Con esta comparación, fue posible determinar la mejor forma de inyección.

La adquisición de datos, señales analógicas procedentes de los diferentes sensores (presión y caudal), se realizó mediante una tarjeta PCI 6023E (N.I.). Los datos se han procesado mediante una aplicación desarrollada en LabVIEW 7.1, con un entrono visual y gráfico adaptado a los ensayos y sensores utilizados. Cada medida, completamente automatizada, ha tenido una duración prestablecida de 10 segundos, durante los cuales se realizaban 100 muestras por segundo, registrándose el promedio de cada segundo. El valor definitivo de cada variable medida fue la media de estos 10 promedios.

Los datos experimentales de los distintos ensayos fueron analizados para buscar relaciones entre las variables y obtener modelos que describan el funcionamiento del inyector. Las herramientas estadísticas básicas empleadas fueron el análisis de la varianza (ANOVA) y los modelos de regresión. Se pretende plantear un modelo que integre las geometrías para, en función de los diámetros, caudales

Figura 3 - Disposición del inyector en fases E1, E2 (dcha.) y E3 (izq.), Valencia, España, 2008



$P_1, P_2, P_3$ : ubicación de los puntos de medida de presión;  $Q_1$  y  $q$ : flujos de entrada al Venturi;  $z_e$ : diferencia de cota entre garganta del Venturi y lámina libre de solución

Tabla 2 - Valores de presión a la entrada de los prototipos,  $P_i$  (m.c.a.), en cada fase, Valencia, España, 2008

F/P	(V1) V1-63-0,3-6	(V2) V2-63-0,3-16	(V3) V3-50-0,3-6	(V4) V4-50-0,2-6
Fase 1	35,4; 29,5; 23,7; 19,9; 13,3; 8,7	39,3; 32,5; 30,4; 23,8; 19,7; 13,5	34,5; 33,8; 21,9; 16,5; 13,7; 9,2	37,9; 33,1; 28; 20,2; 16,8; 8,9
Fase 2	30,0; 19,8; 14,9; 11,0	36,10; 26,2; 21,8; 16,4	24,2; 18,7; 15,5; 10,5	34,7; 25,3; 18,6; 14,1
Fase 3	29,0; 29,2; 29,5; 24,5; 24,6; 19,8; 19,6; 19,6; 15,76; 15,57; 15,38	30,1; 30,1; 25,4; 25,0; 25,0; 19,9; 20,3; 20,0; 14,6; 14,3; 13,9	26,1; 26,2; 21,7; 21,6; 20,3; 20,0; 15,5; 15,4; 15,2; 10,5; 10,7; 10,1	30,3; 30,2; 30,1; 25,9; 25,8; 25,4; 20,1; 20,4; 20,3; 17,0; 17,0

F (columna): fase; P (línea): prototipo

y presiones, proporcionar una expresión que prediga la pérdida de carga o el caudal inyectado; esto se llevó a cabo mediante análisis de regresión lineales o con adaptaciones no lineales, auxiliada por la técnica de la 'Regresión Paso a Paso' (*Stepwise Regression*). El programa informático empleado que incluye estas herramientas es el *Statgraphics Plus.5.1*.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Fase E1: sin inyección

El tratamiento estadístico (Tabla 3) demuestra que los mejores ajustes para presión diferencial, DP (m.c.a.),

pérdidas totales en el inyector,  $\Delta h_v$  (m.c.a.), y diferencia de presión entre la garganta y la salida,  $P_3-P_2$  (m.c.a.),

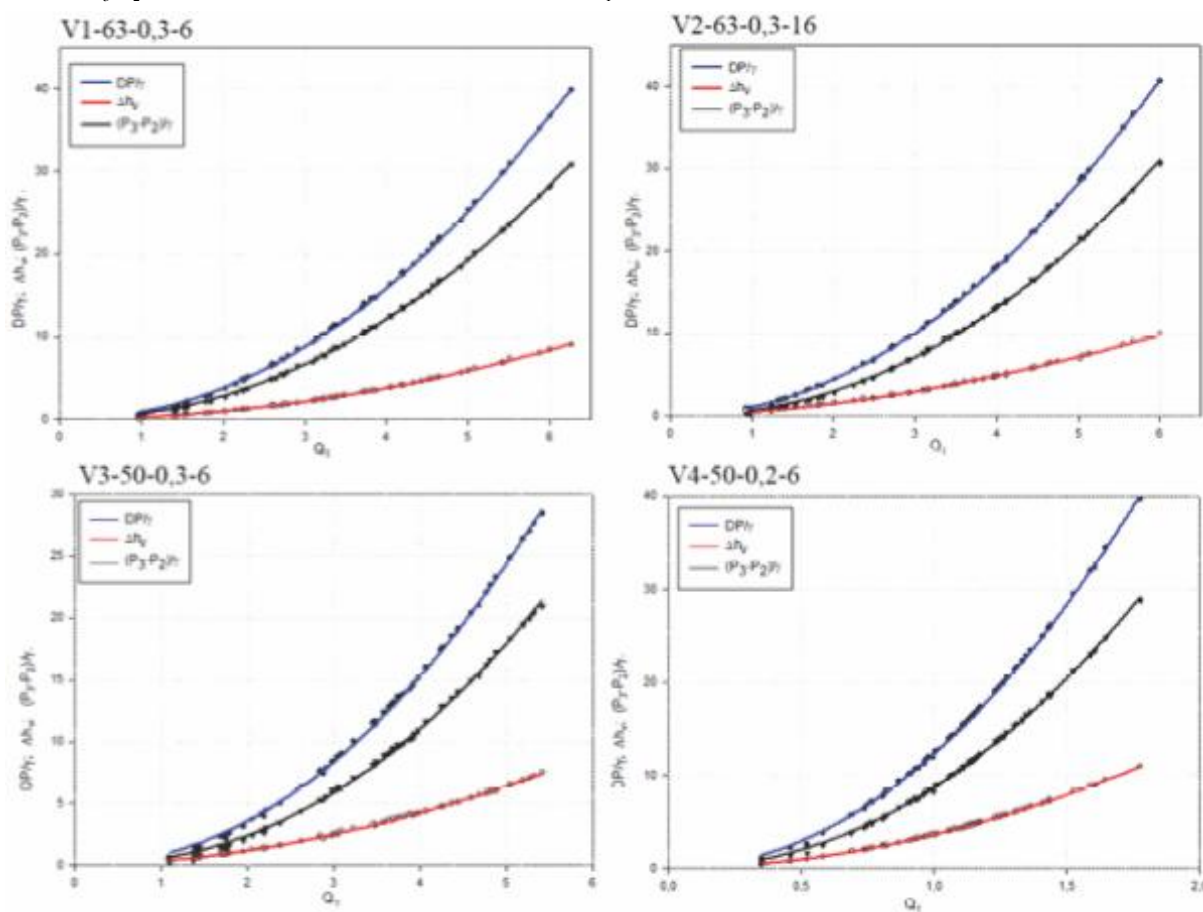
en función de lo caudal principal,  $Q_1$  ( $L s^{-1}$ ), son de tipo potencial (Ecuaciones 1 a 12 y Figura 4).

**Tabla 3** - Resumen del análisis de varianza de la regresión, Valencia, España, 2008

Prototipo	(V1) V1-63-0,3-6			(V2) V2-63-0,3-16			(V3) V3-50-0,3-6			(V4) V4-50-0,2-6		
Variable	DP	$\Delta h_v$	$(P_3-P_2)$	DP	$\Delta h_v$	$(P_3-P_2)$	DP	$\Delta h_v$	$(P_3-P_2)$	DP	$\Delta h_v$	$(P_3-P_2)$
G.L. (Reg.)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G.L. (Res.)	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
Total	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
C.M. (Reg.)	5264**	271**	3146**	5667**	315**	3309**	3554**	223**	1995**	4479**	326**	2387**
C.M. (Res.)	0,032	0,003	0,020	0,010	0,010	0,030	0,050	0,004	0,057	0,027	0,001	0,027
Total	99,35	5,10	59,40	107,00	5,94	62,50	59,30	3,73	33,29	68,93	5,02	36,75
E.E. (coef. a)	0,010	0,003	0,008	0,006	0,009	0,010	0,014	0,005	0,013	0,025	0,005	0,024
E.E. (coef. b)	0,007	0,008	0,007	0,004	0,014	0,009	0,011	0,010	0,016	0,006	0,004	0,008
E.E.E.	0,179	0,053	0,148	0,100	0,108	0,178	0,231	0,064	0,178	0,165	0,034	0,163

\*\*altamente significativo para el test F ( $0,01 \leq p < 0,001$ ); DP (presión diferencial, m.c.a.);  $\Delta h_v$  (pérdidas totales en el inyector, m. c. a.);  $P_3-P_2$  (m. c. a.); G. L.: grados de libertad; Reg.: regresión; Res.: residual; C. M.: cuadrado medio; coef.: coeficiente; E. E.: error estándar; E. E. E.: error estándar de la estimación

**Figura 4** - Presión diferencial, DP (m.c.a.), pérdidas totales en el inyector,  $\Delta h_v$  (m.c.a.) y diferencia de presión entre la garganta y la salida,  $P_3-P_2$  (m.c.a.), en función de lo caudal principal,  $Q_1$  ( $L s^{-1}$ ), Valencia, España, 2008



- (V1)  $DP = 0,9050Q_1^{2,006}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (01) (V1) $q = -1499,52 P_1^{0,2531} + 1341,15 Q_1^{0,5737}$  ( $R^2=0,92$ ;E.E.: a=1389,12; b=0,13; c=1295,83; d=0,28; E.E.E.=2285) (13)
- (V1) $\Delta h_v = 0,2423Q_1^{1,9776}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (02) (V2) $q = -9258,79 P_1^{0,3257} + 7358,8 Q_1^{0,7584}$  ( $R^2=0,92$ ;E.E.: a=10326,4; b=0,17; c=9029,2; d=0,40; E.E.E.=85,55) (14)
- (V1) $P_3 - P_2 = 0,6651Q_1^{2,0936}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (03) (V3) $q = -418,14 P_1^{0,4888} + 332,317 Q_1^{1,1119}$  ( $R^2=0,92$ ;E.E.: a=381,13; b=0,21; c=321,66; d=0,45; E.E.E.=20,16) (15)
- (V2)  $DP = 1,1013Q_1^{2,015}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (04) (V4) $q = -1499,52 P_1^{0,2531} + 1341,15 Q_1^{0,5737}$  ( $R^2=0,92$ ;E.E.: a=86,45; b=0,15; c=260,69; d=0,31; E.E.E.=13,24) (16)
- (V2) $\Delta h_v = 0,453Q_1^{1,7132}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (05) (06) (07) (08) (09) (10) (11) (12)
- (V2) $P_3 - P_2 = 0,6919Q_1^{2,1221}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (06)
- (V3)  $DP = 0,893Q_1^{2,027}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (07)
- (V3) $\Delta h_v = 0,3274Q_1^{1,8463}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (08)
- (V3) $P_3 - P_2 = 0,5329Q_1^{2,1858}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (09)
- (V4)  $DP = 12,3337Q_1^{2,0531}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (10)
- (V4) $\Delta h_v = 3,6261Q_1^{1,9258}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (11)
- (V3) $P_3 - P_2 = 8,7091Q_1^{2,1035}$  ( $R^2 = 0,99$ ) (12)

La mejor relación entre el caudal inyectado, q (Lh<sup>-1</sup>), y la presión de entrada, P<sub>1</sub> (m.c.a.), y diferencia de energía, ΔH<sub>a</sub> (m.c.a.), corresponde a funciones multivariable no lineales (Tabla 5 y Ecuaciones 17 a 20).

- (V1) $q = 228,81\Delta H_a^{0,5237}P_1^{-0,3782}$  ( $R^2=0,91$ ;E.E.:a=0,81;b=0,04; c=0,06;E.E.E.=22,23) (17)
- (V2) $q = 424,735\Delta H_a^{0,7845}P_1^{-0,3088}$  ( $R^2=0,91$ ;E.E.:a=77,70; b=0,03; c=0,05;E.E.E.=53,07) (18)
- (V3) $q = 860,53\Delta H_a^{0,4565}P_1^{-0,9273}$  ( $R^2=0,91$ ;E.E.:a=297,8; b=0,06; c=0,12;E.E.E.=24,40) (19)
- (V4) $q = 207,125\Delta H_a^{0,5080}P_1^{-0,4553}$  ( $R^2=0,92$ ;E.E.:a=57,46; b=0,06; c=0,09;E.E.E.=17,12) (20)

Los parámetros estadísticos explican que las diferencias de presiones pueden estimarse con mucha exactitud a partir del caudal ( $0,9989 \leq R^2 \leq 0,9999$ ). El intervalo de confianza es grande, pues los errores estándar de la estimación son pequeños ( $0,0230 \leq E.E.E. \leq 0,033$ ).

**Fase E2: inyección inferior**

La mejor relación entre el caudal inyectado, q (L h<sup>-1</sup>) y la presión y el caudal de entrada, P<sub>1</sub> (m.c.a.) y Q<sub>1</sub> (L s<sup>-1</sup>), respectivamente, son del tipo no lineal multivariable (Tabla 4 y Ecuaciones 13 a 16).

En los diferentes prototipos, los mejores ajustes para la pérdida de carga en los Venturis, Δh<sub>v</sub> (m.c.a.), en función del caudal inyectado, q (L h<sup>-1</sup>) y caudal principal, Q<sub>1</sub> (L s<sup>-1</sup>), corresponden a funciones multivariable no lineales (Tabla 6 y Ecuaciones 21 a 24).

**Tabla 4 -** Resumen del análisis de varianza de la regresión, Valencia, España, 2008

Fuente de la variación	Regresión		Residual		Total	Total (correlación)
	Prototipo	G.L.	C.M.	G.L.	C.M.	G.L.
(V1) V1-63-0,3-6	4	237095,0**	35	522,3	39	38
(V2) V2-63-0,3-16	4	3100000,0**	37	6651,3	41	40
(V3) V3-50-0,38-6	4	97777,6**	21	406,8	25	24
(V4) V4-50-0,2-6	4	97777,6**	21	406,8	25	24

\*\*altamente significativo para el test F (0,01 ≤ p < 0,001); G.L.: grados de libertad; C.M.: cuadrado medio

**Tabla 5 -** Resumen del análisis de varianza de la regresión, Valencia, España, 2008.

Fuente de la variación	Regresión		Residual		Total	Total (correlación)
	Prototipo	G.L.	C.M.	G.L.	C.M.	G.L.
(V1) V1-63-0,3-6	3	316784,0**	36	494,2	36	35
(V2) V2-63-0,3-16	3	4191400,0**	38	2816,6	41	40
(V3) V3-50-0,38-6	3	136697,0**	21	595,7	24	23
(V4) V4-50-0,2-6	3	147569,0**	29	293,4	32	31

\*\*altamente significativo por lo teste F (0,01 ≤ p < 0,001); G.L.: grados de libertad; C.M.: cuadrado medio

**Tabla 6** - Resumen del análisis de varianza de la regresión, Valencia, España, 2008

Fuente de la variación	Regresión		Residual		Total	Total (correlación)
Prototipo	G.L.	C.M.	G.L.	C.M.	G.L.	G.L.
(V1) V1-63-0,3-6	3	814,9**	48	0,2	51	50
(V2) V2-63-0,3-16	3	1027,8**	32	0,6	35	34
(V3) V3-50-0,38-6	3	542,3**	56	0,0	59	58
(V4) V4-50-0,2-6	3	534,7**	24	0,2	27	26

\*\*altamente significativo para el test F (0,01 ≤ p < 0,001); G.L.: grados de libertad; C.M.: cuadrado medio

(V1)  $\Delta h_v = 0,265949Q_1^{1,7600}q^{0,0762}$  (R<sup>2</sup>=0,92; E.E.: a=0,04; b=0,08; c=0,01; E.E.E.=0,41) (21)

(V2)  $\Delta h_v = 0,13091Q_1^{1,7298}q^{0,2098}$  (R<sup>2</sup>=0,89; E.E.: a=0,03; b=0,12; c=0,02; E.E.E.=0,78) (22)

(V3)  $\Delta h_v = 0,42053Q_1^{1,6132}q^{0,0276}$  (R<sup>2</sup>=0,96; E.E.: a=0,02; b=0,03; c=0,004; E.E.E.=0,14) (23)

(V4)  $\Delta h_v = 3,16782Q_1^{1,7149}q^{0,0870}$  (R<sup>2</sup>=0,95; E.E.: a=0,25; b=0,07; c=0,01; E.E.E.=0,14) (24)

**Fase E3: inyección superior**

La variable significativa en la estimación del caudal inyectado, q (L h<sup>-1</sup>), es la diferencia de energía, ΔH<sub>a</sub> (m.c.a.) (Tabla 7). La mejor relación obtenida es del tipo potencial (Ecuaciones 25 a 28 y Figura 5).

(V1)  $q = 56,5864\Delta H_a^{0,7348}$  (R<sup>2</sup>=0,91; E.E.: a=1,11; b=0,014; E.E.E.=2,88) (25)

(V2)  $q = 167,037\Delta H_a^{0,8235}$  (R<sup>2</sup>=0,94; E.E.: a=2,27; b=0,012; E.E.E.=7,89) (26)

(V3)  $q = 48,2964\Delta H_a^{0,8018}$  (R<sup>2</sup>=0,89; E.E.: a=2,04; b=0,017; E.E.E.=2,42) (27)

(V4)  $q = 41,1022\Delta H_a^{0,8307}$  (R<sup>2</sup>=0,93; E.E.: a=0,34; b=0,009; E.E.E.=2,75) (28)

Los mejores ajustes para la pérdida de carga, Δh<sub>v</sub> (m.c.a.), en relación el caudal inyectado, q (L h<sup>-1</sup>) y al

caudal principal, Q<sub>1</sub> (L s<sup>-1</sup>), en los diferentes prototipos corresponden a funciones multivariable no lineales (Tabla 8 y Ecuaciones 29 a 32).

(V1)  $\Delta H_v = 0,198876Q_1^{2,1136} + 6,902(10^{-7})q^{2,6301}$  (R<sup>2</sup>=0,96; E.E.: a=0,026; b=0,075; c=0,000; d=0,546; E.E.E.=22,850) (29)

(V2)  $\Delta H_v = 0,311522Q_1^{1,7405} + 0,12094q^{0,5259}$  (R<sup>2</sup>=0,84; E.E.: a=0,483; b=0,684; c=0,425; d=0,431; E.E.E.=0,960) (30)

(V3)  $\Delta H_v = 0,3796Q_1^{1,7267} + 0,014144q^{0,65623}$  (R<sup>2</sup>=0,97; E.E.: a=0,03; b=0,05; c=0,03; d=0,39; E.E.E.=0,140) (31)

(V4)  $\Delta H_v = 3,29909Q_1^{2,1280} + 0,0442005q^{0,7653}$  (R<sup>2</sup>=0,96; E.E.: a=0,40; b=0,15; c=0,10; d=0,37; E.E.E.=0,140) (32)

En la Figura 6, se presenta las pérdidas de carga (Δh<sub>v</sub>) frente al caudal inyectado (q) para la inyección inferior (Δh<sub>v inf</sub>) y superior (Δh<sub>v sup</sub>), en cada prototipo.

La pendiente de los ajustes para el prototipo V1 es creciente y decreciente pare le V2. Este hecho, siendo iguales (β) y (D<sub>1</sub>), puede explicarse dado que, para un determinado incremento de (q), es necesario un mayor incremento del (Q<sub>1</sub>). También, (q) aumenta con (d), a igualdad del resto de condiciones. Para los prototipos V1 y V3, con mismo (D<sub>2</sub>), las pérdidas de carga aumentan con el aumento de (β). Para V3 y V4, con mismo (D<sub>1</sub>), las pérdidas en el Venturi disminuyen al aumentar (β). Para cualquier caudal inyectado en todos los prototipos, las pérdidas son menores con la inyección superior.

**Tabla 7** - Resumen del análisis de varianza de la regresión, Valencia, España, 2008

Fuente de la variación	Regresión		Residual		Total	Total (correlación)
Prototipo	G.L.	C.M.	G.L.	C.M.	G.L.	G.L.
(V1) V1-63-0,3-6	2	76988,1**	339	2811,8	341	340
(V2) V2-63-0,3-16	2	472306,4**	447	62,3	449	448
(V3) V3-50-0,38-6	2	26722,0**	585	5,9	587	586
(V4) V4-50-0,2-6	2	93777,5**	867	7,6	869	868

\*\*altamente significativo para el test F (0,01 ≤ p < 0,001); G.L.: grados de libertad; C.M.: cuadrado medio



Figura 5 - Caudal inyectado,  $q$  ( $L \cdot h^{-1}$ ) versus la diferencia de energía,  $\Delta H_a$  (m.c.a.), Valencia, España 2008.

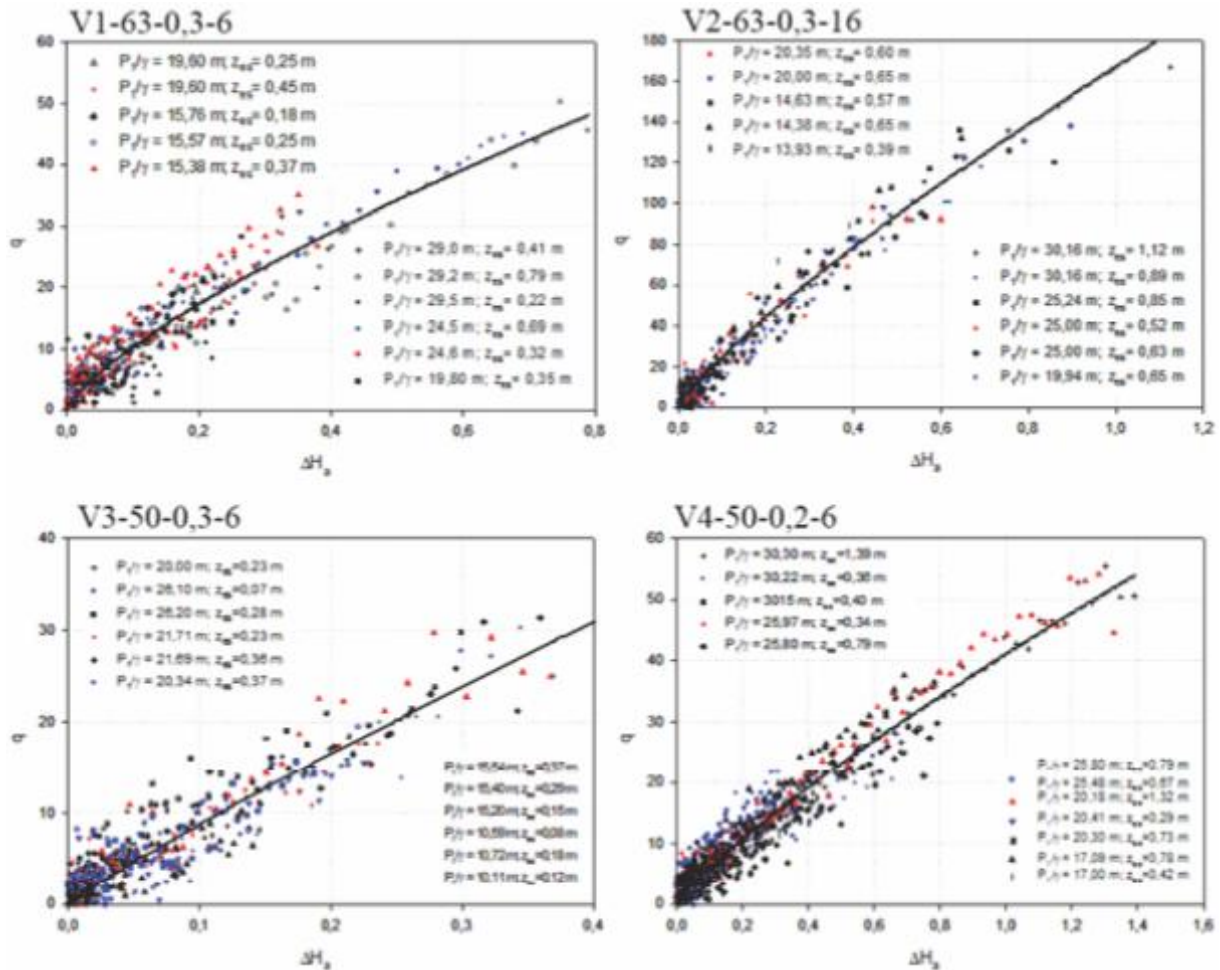


Tabla 8 - Resumen del análisis de varianza de la regresión, Valencia, España, 2008

Fuente de la variación	Regresión		Residual		Total	Total (correlación)
Prototipo	G.L.	C.M.	G.L.	C.M.	G.L.	G.L.
(V1) V1-63-0,3-6	4	612,3**	47	0,1	51	50
(V2) V2-63-0,3-16	4	768,6**	31	0,9	35	34
(V3) V3-50-0,38-6	4	406,7**	55	0,0	59	58
(V4) V4-50-0,2-6	4	401,4**	23	0,2	27	26

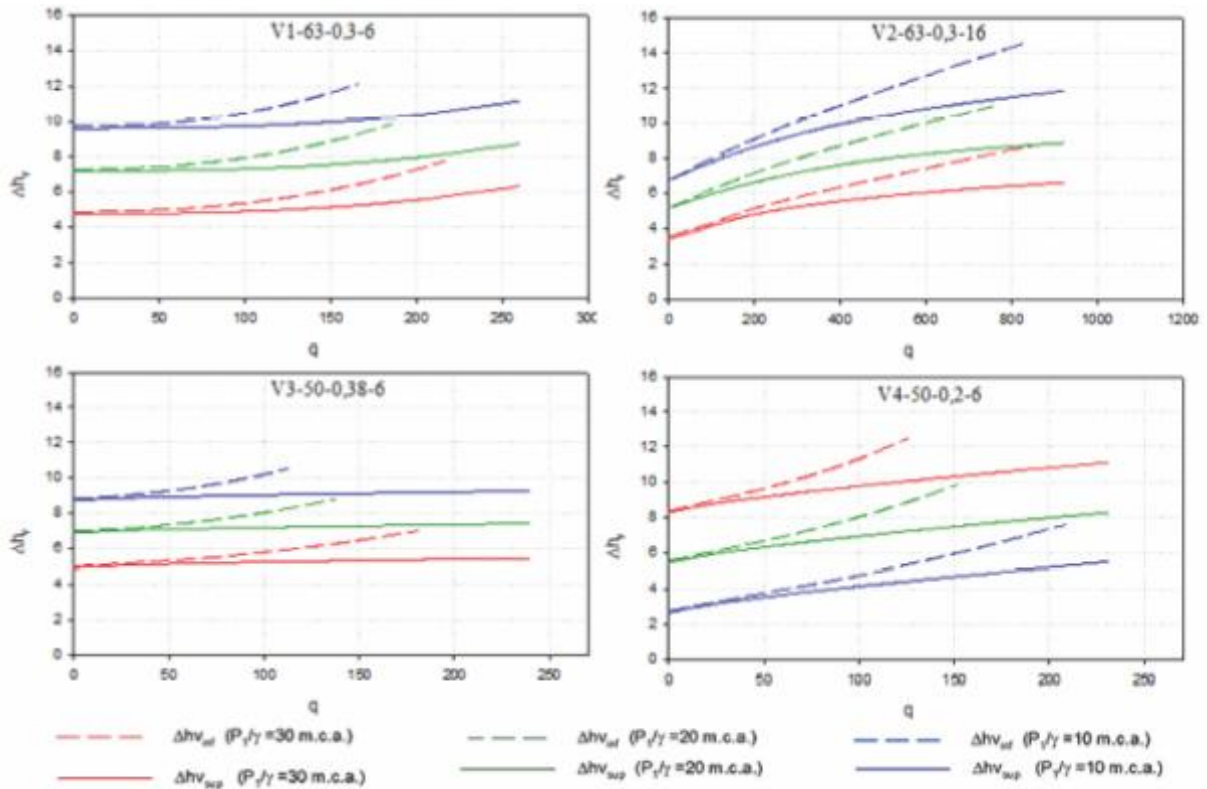
\*\*altamente significativo por lo teste F ( $0,01 \leq p < 0,001$ ); G.L.: grados de libertad; C.M.: cuadrado medio

En la Figura 7, se presenta la relación de caudales ( $q/Q_1$ ) en función de la diferencia de energía entre la solución madre y la garganta ( $\Delta H_a$ ) para la inyección inferior ( $\Delta h_{v \text{ inf.}}$ ) y superior ( $\Delta h_{v \text{ sup.}}$ ), en cada prototipo.

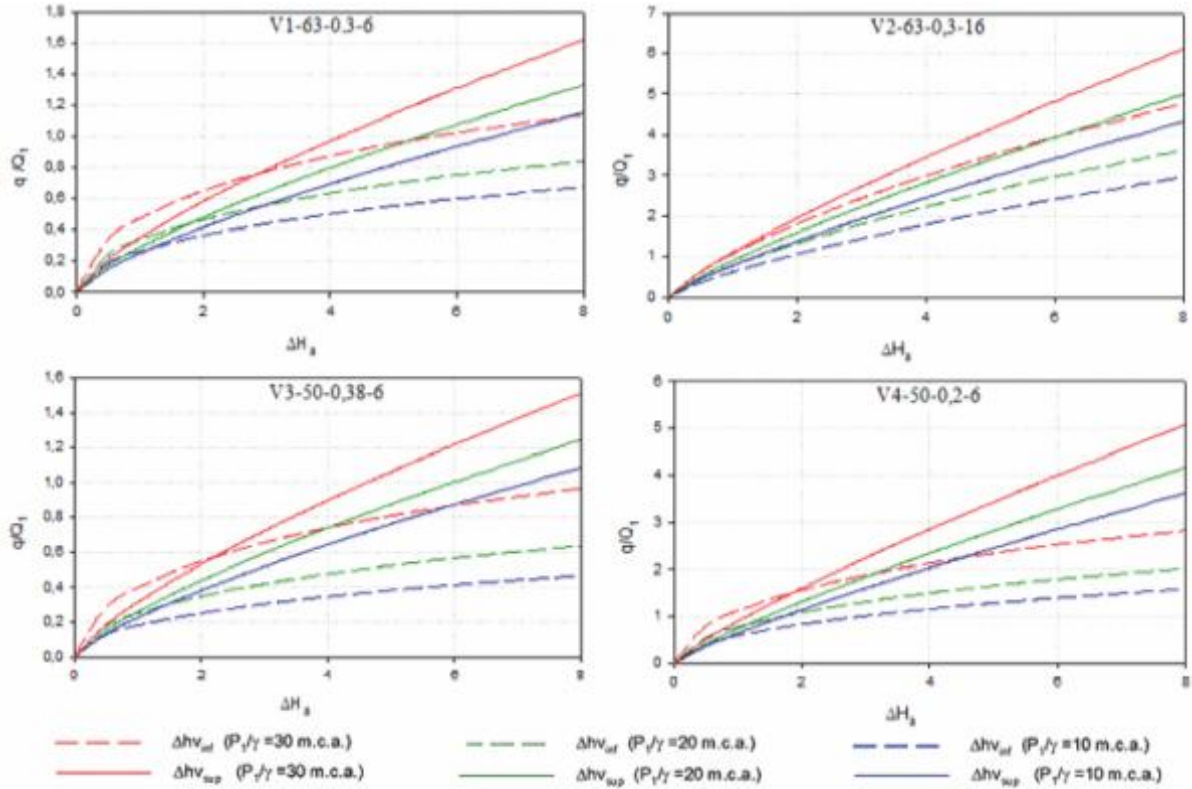
Para V1 y V2 (de mismo  $\beta$  y  $D_1$ ), el  $q/Q_1$  aumenta con lo aumento de ( $d$ ). Entre V1 y V3 (de mismo  $D_2$ ),  $q/Q_1$

aumenta con la reducción de ( $\beta$ ). Para V3 y V4 (mismo  $D_1$ ),  $q/Q_1$  aumenta con la reducción de ( $\beta$ ). Así que, a igualdad del resto de variables aumenta con el diámetro del conducto de aspiración y con el diámetro de entrada al Venturi, disminuyendo con el aumento de ( $\beta$ ). La relación de caudales es superior cuando la inyección se produce desde arriba.

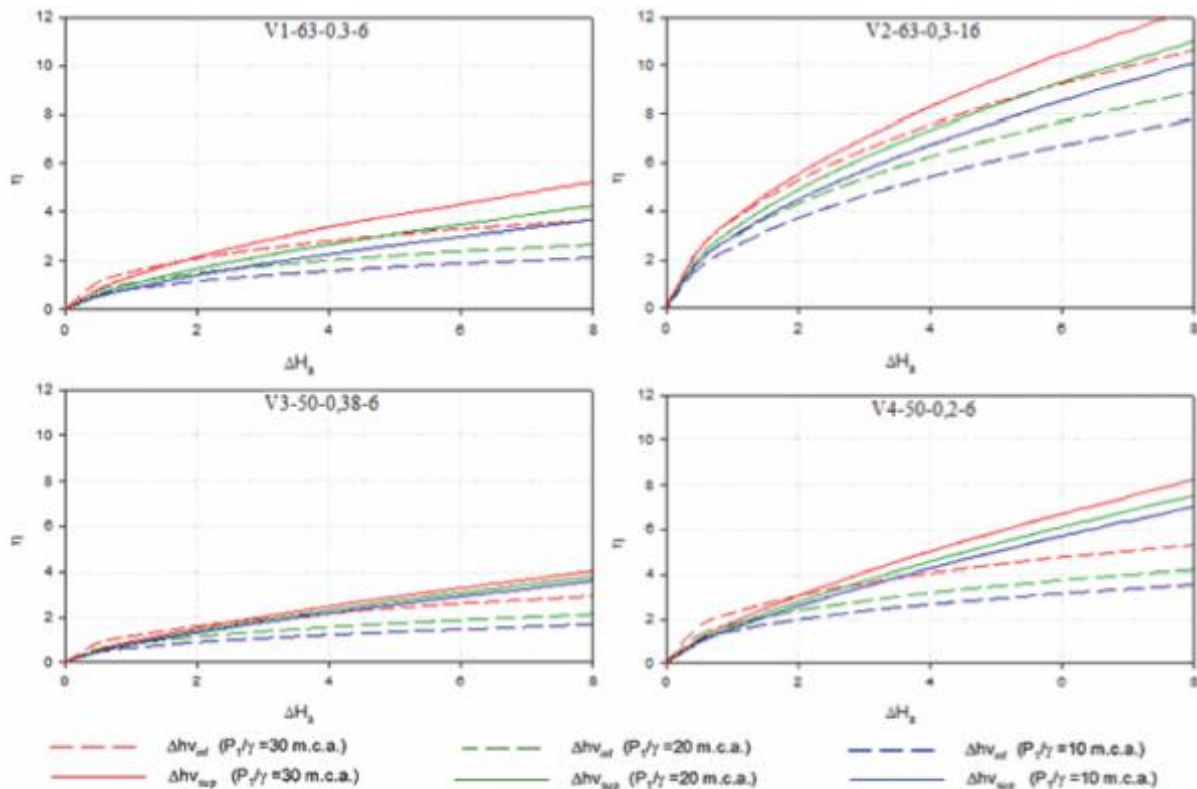
**Figura 6** - Pérdidas de carga,  $\Delta h_v$  (m.c.a.), en función de lo caudal inyectado,  $q$  (L h<sup>-1</sup>), Valencia, España, 2008



**Figura 7** - Relación de caudales,  $q/Q$  (%), en función de la diferencia de energía entre la solución madre y la garganta,  $\Delta H_s$  (m.c.a.), Valencia, España, 2008



**Figura 8** - Rendimiento,  $\eta$  (%), en función de la diferencia de energía entre la solución madre y la garganta,  $\Delta H_a$  (m.c.a.), Valencia, España, 2008



La Figura 8, tiene el rendimiento ( $\eta$ ) de cada prototipo con la diferencia de energía entre la solución madre y la garganta ( $\Delta H_a$ ) para la inyección inferior ( $\Delta h_{v\ inf.}$ ) y superior ( $\Delta h_{v\ sup.}$ ).

Entre V1 y V2 (de mismo  $\beta$  y  $D_1$ ), el ( $\eta$ ) aumenta con lo aumento de ( $d$ ). Para V1 y V3 (de mismo  $D_2$ ), el ( $\eta$ ) aumenta con la reducción de ( $\beta$ ). Para V3 y V4 (mismo  $D_1$ ), el ( $\eta$ ) aumenta con la reducción de ( $\beta$ ). Por lo tanto, ( $\eta$ ) aumenta con el ( $d$ ) y disminuye con ( $\beta$ ). Si al disminuir ( $\beta$ ) aumentan las pérdidas y la relación de caudales de los datos experimentales, se acaba de concluir que disminuye con ( $\beta$ ); puede afirmarse que en el rendimiento tiene más influencia en la relación de caudales que las pérdidas de carga.

Puede deducirse que, el rendimiento, a igualdad del resto de condiciones, es superior si se inyecta desde arriba. Estos resultados acordan con los del Bortolini *et al.* (2010), que también verificaron la superioridad de la inyección superior por lo inyector Venturi en la fertirrigación.

## CONCLUSIONES

1. La instalación de lo inyector Venturi en serie, con inyección superior, presenta ventajas, a igualdad de caudal inyectado,

frente a inyección inferior: las pérdidas de carga son siempre inferiores; la relación de caudales es siempre superior; la presión requerida a la entrada también es menor;

2. Para modelos como los prototipos V1, V2, V3 y V4, el caudal incorporado con inyección superior puede estimarse, excepto para pequeños caudales inyectados, con las expresiones (25), (26), (27) y (28), respectivamente. Para la inyección inferior, se proponen las expresiones (17), (18), (19) y (20). El caudal inyectado aumenta con el diámetro de aspiración y las pérdidas son siempre menores cuantos mayores es la relación entre diámetros. La relación de caudales aumenta con los diámetros de aspiración y de entrada al inyector, disminuyendo con el aumento de la relación entre diámetros. El rendimiento aumenta con el diámetro del conducto de aspiración y disminuye con la relación entre diámetros.

## REFERENCIAS

ARMINDO, R. A. *et al.* Avaliação do sistema de pulverização com funcionamento intermitente, acoplado ao pivô central, Notliada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 26-32, 2009.

ARVIZA, J. Dispositivos para fertirrigación en sistemas de riego localizado. **Vida Rural**, n. 123, p. 34-40, 2001.

BORTOLINI, A. *et al.* Desempenho de um injetor de fertilizante tipo Venturi empregado em fertirrigação. In: Seminário Sistemas de Produção Agropecuária - Ciências Agrárias, Animais e Florestais, 2010. **Anais...** Dois Vizinhos: UTFPR, 2010. p. 1-5.

CUNHA, J. P. A. R. da. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes métodos de aplicação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 4, p. 487-493, 2008.

GHIDIU, G. *et al.* Drip Chemigation of insecticides as a pest management tool in vegetable production. **Journal of Integrated Pest Management**, v. 3, n. 3, p. 1-5, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Irrigation equipment. Differential pressure Venturi fertilizer injectors**. Genova, 2002. 7 p.

KING, B. A.; WALL, R. W.; TABERNA JÚNIOR, J. P. Spatially distributed control network for flow proportional chemical injection with center pivot sprinkler irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 25, n. 5, p. 677-683, 2009.

MANZANO-JUÁREZ, J. **Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de riego localizado**. 2008. 248 f. Tesis Doctoral - Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2008.

MONTALVO LÓPEZ, T. **Ingeniería Hidráulica**. Valencia: Ediciones VJ. 2007. 420 p.

SANTOS, L. da C. *et al.* Estudo comparativo da taxa de injeção em injetor do tipo Venturi com e sem válvula de retenção. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 145 - 154, 2012.

REDING, M. E.; ZHU, H.; DERKSEN, R. Drip chemigation with imidacloprid and nematodes for control of scarab larvae in nursery crops. **Journal of Environmental Horticulture**, v. 26, n. 2, p. 93-100, 2008.

PERALTA, M. Á. P.; SCHLAM, F. H.; TZEC, J. A. Y. Inyección de fertilizante con bombas de paletas y control por conductividad eléctrica en soluciones madre para fertirriego. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 19, n. 3, p. 35-42, 2010.

SUN, Y.; NIU, W. Simulating the Effects of Structural Parameters on the Hydraulic Performances of Venturi Tube. **Modelling and Simulation in Engineering**, v. 1, p. 1-7, 2012.