

# Criterio sobre la formulación matemática para el cálculo de las pérdidas por evaporación y arrastre en emisores de baja presión

*Approach on the mathematical formulation for the calculation of the losses for evaporation and haulage in low pressure transmitters*

Maiquel Lopez S<sup>1</sup>; Albi Mujica C<sup>2</sup> y Leonel Duarte N<sup>3</sup>

**RESUMEN.** En el trabajo se realizó un estudio con los emisores de baja presión, que utilizan las máquinas de pivote central, Spray, Senninger e IIRD llevándose a cabo en un banco de prueba en condiciones de campo. Se calculan las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) reales y por ecuaciones empíricas, basada en las medidas con pluviómetros del agua que llega al suelo. Además de las principales variables que interviene en el proceso; así como proponer una ecuación para el cálculo de las mismas, haciendo un análisis de regresión múltiple. Los resultados reflejaron que las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) reales en los emisores de baja presión oscilaron entre el 1,21% a 30,03% mientras que las calculadas por la ecuación empírica propuesta fluctuaron entre 1,97% -25,17%. Las variables fundamentales que aportó el estudio para estimar las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA), fueron la presión de trabajo, velocidad del viento y el déficit de la presión de vapor de agua. Se logró además la ecuación de mejor ajuste con  $R^2 = 0,904439$  según el análisis de regresión múltiple realizado.

**Palabras clave:** pérdidas, evaporación, emisor.

**ABSTRACT.** In this work it was carried out a theoretical-practical study in a test bank outdoors with the low pressure transmitter that the machines of central pivot, Spray, Senninger and IIRD use. The losses by real evaporation and haulage (PEA) and for empiric equations, based on the measures with water pluviometer that arrives to the land are calculated. Besides the main variables that intervene in the process; as well as to propose an equation for the calculation of them, making an analysis of multiple regression. The results reflected that the losses for real evaporation and haulage (PEA) in the transmitters of low pressure oscillated from 1,21% to 30,03%, while those calculated by the proposal empiric equation fluctuated from 1,97% to 25,17%. The fundamental variables that it contributed are the study to estimate the losses for evaporation and haulage (PEA), the work pressure, wind speed and the deficit of the vapor of water pressure. It was also achieved the equation of better adjustment with  $R^2 = 0,904439$  according to the carried out analysis of multiple regression.

**Keywords:** losses, evaporation, transmitter.

## INTRODUCCIÓN

En las áreas de suministro de agua para la agricultura se hace necesario la conservación de los recursos hídricos debido a que es el sector que más utiliza este apreciado líquido a nivel mundial, por tanto se requiere de una elevada eficiencia de los sistemas de riego.

Los principios del riego se han desarrollado al punto que

la eficiencia de aplicación es controlada principalmente por la cantidad de pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) que está presentando el sistema de riego. Las pérdidas en el riego, principalmente en las zonas áridas y semiáridas, pueden sumar a una proporción considerable agua descargada por los emisores. Bavi *et al.* (2009).

La magnitud de las PEA se ven afectadas por distintos factores como el modelo del emisor y las condiciones climáticas

**Recibido** 20/07/09, aprobado 31/03/11, trabajo 29/11, investigación.

<sup>1</sup> Ing., Prof. e Inv., Universidad de Ciego de Ávila, Facultad de Ingeniería Cuba, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba. E-✉: [maiquel@ingenieria.unica.cu](mailto:maiquel@ingenieria.unica.cu)

<sup>2</sup> Dr.C., Prof e Inv. Titular, Universidad de Ciego de Ávila, Facultad de Ingeniería Cuba, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.

<sup>3</sup> MSc., Prof. e Inv. Universidad de Ciego de Ávila, Facultad de Ingeniería Cuba, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

Tarjuelo *et al.* (2000). Por lo que se hace necesario encontrar los factores fundamentales que afectan el proceso. Teniendo esta investigación como objetivo fundamental determinar las relaciones entre las pérdidas y los factores que intervienen, así como proponer una ecuación para el cálculo de las mismas.

Debido a que las máquinas de pivote central eléctrico sustentan un peso importante dentro de las producciones agrícolas y el desarrollo tecnológico que ha venido el mismo conjunto con los emisores de baja presión ha creado necesidades de investigación. Tomando entonces como objeto de estudio además los emisores Spray, de la Transnacional Nelson Irrigation, Senninger de la Transnacional Irrigation Inc y el IIRD del Instituto de Riego y Drenaje de Cuba para el cálculo de las PEA, debido a la falta de uniformidad en las definiciones usadas, la precisión de las medidas realizadas, el sistema de riego evaluado y las condiciones meteorológicas de los ensayos.

En los métodos de estimación de las PEA basadas en las medidas con pluviómetros del agua que llega al suelo, se cometen errores inevitables. En experiencias con pluviómetros, las pérdidas se cuantifican entre el 2 y 40%, mayoritariamente

entre el 5 y el 15% (Yasar, 1984; Seginer, 1981; Montero, 1997), mencionados por Tarjuelo (2005).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez” localizada en las coordenadas 21° 50' latitud Norte y 78° 40' de longitud Oeste durante el período de febrero-abril de 2010, donde se construyó un banco de prueba al aire libre, en el que se evaluaron tres boquillas de los emisores de baja presión Spray 22 ( $\phi 4,37$  mm), Senninger 11 ( $\phi 4,37$  mm) y el IIRD que presenta ( $\phi 4,50$  mm) a tres presiones de trabajo diferente; 100 kPa; 200 kPa; 280 kPa. Se llevaron a cabo un total de 111 observaciones en horas nocturnas y diurnas, con 1 y 2 m, de altura respecto a la superficie del suelo para obtener una amplia gama de condiciones hidráulicas y climáticas. El tiempo de funcionamiento del emisor en cada ensayo fue de 1 hora. Los colectores fueron colocados como lo indica la Figura 1 a cobertura completa de forma radial con 8 radios y un espaciamiento de 0,25 m.

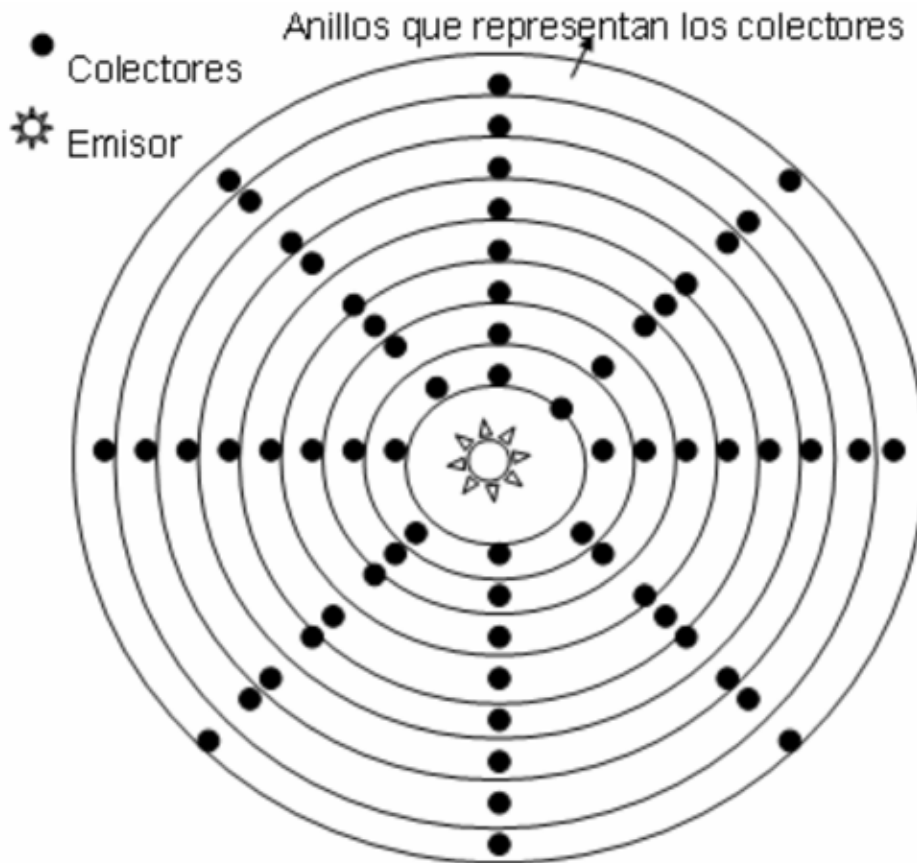


FIGURA 1. Esquema de los ocho radios con los colectores y la representación de los anillos que simbolizan el área de cada colector.

Se utilizaron varios equipos calibrados para las mediciones de las variables hidráulicas y climáticas, dentro de ellos un anemómetro portátil tomando las velocidades del viento cada 15 minutos durante el ensayo; así como el termómetro-hidrómetro digital, estando en los rangos de (0 - 50 °C) y (2% - 98%). Además fue instalada una toma manométrica sobre la tubería de polietileno justo antes de entrar al emisor, cuyo manómetro utilizado mide valores en un rango de 0 a 6 bar y a intervalos de 0,1 bar.

Las PEA se calcularon en todos los ensayos realizados por la ecuación (1). El volumen de agua recogido se calculó promediando las láminas correspondientes a cada radio (de 0.25 m en 0.25 m) y multiplicando luego por el área del anillo representativo donde se encontraban los pluviómetros, de esta manera se asignaba a todo el anillo la misma cantidad de agua que la promedio de

la recogida por los pluviómetros correspondientes. El volumen aplicado era el obtenido a partir del aforo de los emisores o de la ecuación de caudal en función de la presión.

$$PEA = 100 \left( \frac{Vol.aplic - Vol.recog}{Vol.aplic} \right) \tag{1}$$

donde:

PEA-Pérdidas por evaporación y arrastre, %;

Vol. Aplic.-Volumen aplicado,L;

Vol. Recog- volumen recogido, L.

Para la obtención del déficit de la presión de vapor de agua se utilizó la ecuación (2) desarrollada por Trimmer (1987).

$$e_s - e_a = 0,61 \exp \left( 17,27 \frac{T}{237,3 + T} \right) \left( 1 - \frac{HR}{100} \right) \tag{2}$$

$e_s - e_a$  -Déficit de la presión de vapor de agua, kPa.

Se utilizó además una base de datos climáticos tomadas para un emisor semi-estacionario en el sur occidental de Irán provincia de Khuzestan por Bavi, *et. al.* (2009). Con los mismos se desea proponer una ecuación de PEA para diferentes condiciones climáticas. Se tomaron una serie de de datos que combinados con los obtenidos por Bavi (2009) y los de dicha investigación fueron de 78 observaciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como es debido se obtuvieron 111 resultados de pérdidas por evaporación y arrastre según la ecuación utilizada para cada ensayo. En la Tabla 1 se facilitan algunas observaciones seleccionadas.

**TABLA 1. Pérdidas por evaporación y arrastre de los emisores de baja presión (Spray, Senninger e IIRD)**

No Obs.	P (bar)	v (m/s)	T (C°)	HR (%)	Ea-Es (kPa)	PEA (%)
1	280	2,20	25,93	36,6	0,27	10,03
8	200	2,03	15,42	82	0,11	6,6
9	100	0,78	12,84	73	0,17	3,16
13	280	3,33	24,68	41,5	0,26	17,37
15	200	0,74	25,8	65,8	0,15	7,2
17	100	2,94	22,22	42,6	0,28	3,02
27	100	1,63	19,18	92	0,04	5,31
39	200	0,55	16,8	74,5	0,15	5,25
42	100	1,14	18,32	94	0,03	2,99
43	280	3,86	19,08	73,6	0,14	24,66
54	200	3,21	96,6	88,8	0,01	16,84
59	280	4,11	29,82	36,4	0,25	25,43
60	200	2,07	28,96	46,6	0,21	21,32
67	280	0,72	10,32	95,8	0,03	10,22
78	200	0,74	13,62	41,4	0,37	8,78
79	100	1,01	19,88	96,66	0,02	3,44
<b>84</b>	<b>100</b>	<b>0,29</b>	<b>13,9</b>	<b>95,6</b>	<b>0,03</b>	<b>1,21</b>
<b>86</b>	<b>280</b>	<b>4,72</b>	<b>17,88</b>	<b>83,2</b>	<b>0,09</b>	<b>30,03</b>
90	200	3,75	10,21	79,6	0,14	26,35
91	100	0,44	19,88	96,66	0,02	3,44
95	280	2,72	22,96	35,4	0,30	19,85
98	200	2,56	29,02	41,2	0,23	15,49
101	100	3,02	20,96	37,2	0,31	5,16
104	280	4,02	26	60	0,17	23,43
108	200	3,20	29	44	0,22	20,72
111	100	3,11	28	47	0,22	11

Las PEA menores fueron del 1,21 % a una presión de funcionamiento del emisor de 100 kPa, velocidad del viento de 0,29 m/s y a un déficit de presión de 0,07 kPa; siendo el valor más elevado de las PEA de 30,03% a una presión de 280 kPa, velocidad del viento de 4,72 m/s y a un déficit de presión de 0,34 kPa. En el análisis de regresión múltiple de los datos obtenidos en la Tabla 1, se logró la ecuación (3) de mejor ajuste con R<sup>2</sup> = 0,826941 para predecir las pérdidas.

$$PEA = p^2 + \frac{(1,98v^2 + 4,66v) + v(e_s - e_a) + \left( \frac{-1,98v^2 - 0,49}{p - 0,44} \right)}{p} \tag{3}$$

donde:

p- presión con que funciona el emisor,kPa;

v- velocidad del viento,m/s;

$e_s - e_a$  -Déficit de la presión de vapor de agua,kPa.

La relación entre las pérdidas reales y las pérdidas obtenidas por la ecuación empírica (3) se pueden apreciar en las Figuras 2 y 3 mediante los gráficos de dispersión, alcanzando la Figura 2 una ecuación lineal con un  $R^2 = 0,7012$ .

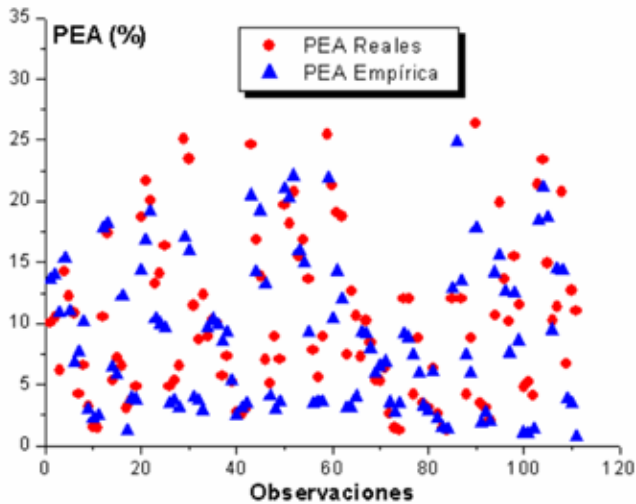


FIGURA 2. Relación entre las pérdidas por evaporación y arrastre reales y empírica y el número de observaciones realizadas.

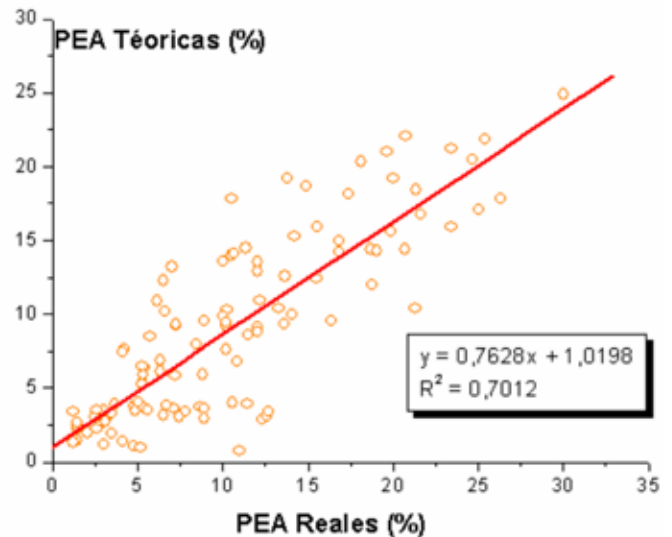


FIGURA 3. Diagrama de dispersión entre las pérdidas por evaporación y arrastre reales y teóricas.

En el análisis de regresión múltiple de los datos obtenidos en la Tabla 1, se logró la ecuación (3) de mejor ajuste con  $R^2 = 0,826941$  para predecir las pérdidas.

Con la combinación de los datos por Bavi (2009) y dicha investigación se realizó un análisis de regresión múltiple generando la ecuación (4) de mejor ajuste con  $R^2 = 0,904439$ , la misma es la que se propone para estimar las pérdidas en los emisores de baja presión que utilizan las máquinas de pivotes centrales.

$$PEA = p + \left( \frac{0,72}{2,94 - p} \right) + v(e_s - e_a)^{0,11} \left( p + \frac{1,07}{3,12 - p} \right)^{3,53 - p} \quad (4)$$

Como podemos apreciar las variables que más dependieron de la ecuación (4) fueron la presión de trabajo del emisor (kPa), la velocidad del viento (m/s) y el déficit de la presión de vapor de agua (kPa).

La relación entre las pérdidas reales y obtenidas por la combinación de datos ecuación empírica (4) se puede apreciar en las Figuras 4 y 5 mediante los gráficos de dispersión, alcanzando la Figura 5 una ecuación lineal con un  $R^2 = 0,8529$  superior al de la Figura 3.

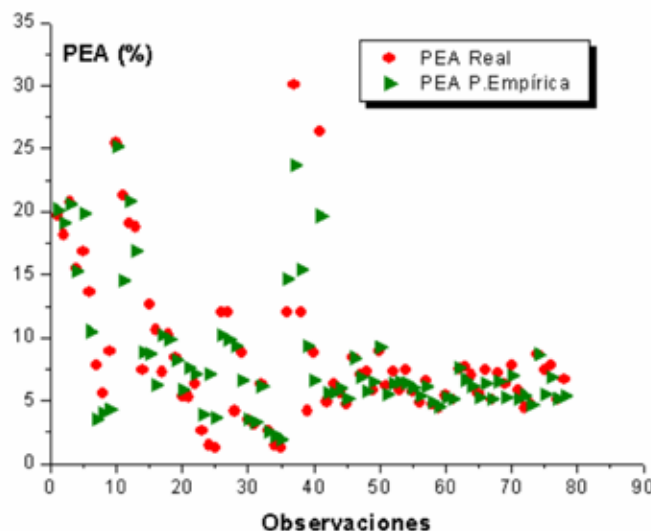


FIGURA 4. Relación entre las pérdidas por evaporación y arrastre reales y empírica combinada y el número de observaciones realizadas.

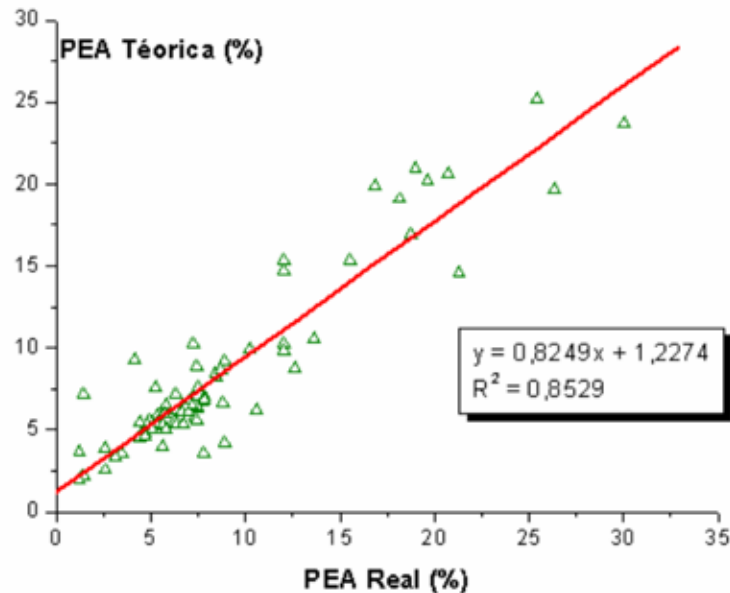


FIGURA 5. Diagrama de dispersión entre las pérdidas por evaporación y arrastre reales y teóricas combinadas.

## CONCLUSIONES

- Las pérdidas por evaporación y arrastre reales en los emisores de baja presión oscilaron entre el 1,21% y 30,03% mientras que las estimadas por la ecuación empírica propuesta fluctuaron entre 1,97 % y 25,17%.
- Las variables climáticas fundamentales que aporta esta investigación para estimar las pérdidas por evaporación y arrastre en los emisores de baja presión de las máquinas de

pivote centrales eléctrica, fueron la presión de trabajo, la velocidad del viento y el déficit de la presión de vapor de agua.

- Por último los resultados de este trabajo evidencian que la ecuación de mejor ajuste es  $R^2 = 0,904439$  según el análisis de regresión múltiple realizado a la combinación de datos, la misma se propone para el cálculo de las pérdidas por evaporación y arrastre.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAVI, A. H.; A. KASHKULI; S. BOROOMAND; A. NASERI and M. ALBAJI: "Evaporation Losses from Sprinkler Irrigation Systems under Various Operating Conditions", Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Sciences Engineering, University of Schahid Chamran, Ahwaz, Iran, *Journal of Applied Sciences*, 9(3): 597-600, 2009.
- CHRISTIANSEN, J.E.: *Irrigation by sprinkling*, 670pp., Calif. Agric. Exp. Stn. Bull. Bull, USA, 1942.
- JIMÉNEZ, E.; M. Domínguez; P. González: *Estimación de las pérdidas por evaporación y arrastre en emisores de baja presión y en máquinas de pivote central*, Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), La Habana, Cuba, 2007.
- KINCAID, D.C. and T.S. LONGLEY: "A water droplet evaporation and temperature model". *Trans. ASAE*, 32: 457-463, 1989.
- LORENZINI, G.: "Air temperature effect on spray evaporation in sprinkler irrigation". *Irrigat. Drainage*, 51: 301-309, 2002.
- MEDINA, P. E.: *Cambio microclimático y perdidas por evaporación y arrastre en riego por aspersión en el maíz*, pp. 45-84, **Tesis de Diploma (en opción al título de Ingeniería Agrícola)** Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza, España, 2006.
- MERKLEY y ALLENDE: *Sprinkle & Trickle Irrigation Lecture Notes*, Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan, Utah, USA, 2004.
- PLAYÁN, E.; F. DECHMI; J.CAVERO; A. MARTÍNEZ-COB and J.M. ACI: *Day and Night Wind Drift and Evaporation Losses in Sprinkler Solid-Sets and Moving Laterals*, Dept. Genetics and Plant Production, Estación Experimental de Aula Dei (EEAD), CSIC, Zaragoza, Spain, 2005.
- TARJUELO, J.M.; F. ORTEGA; J. MONTERO; J.A. DE JUAN: "**Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semiarid conditions**", *Agricultural Water Management*, 43: 263-284, 2000.
- TARJUELO, J. M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, pp. 240-300, 3ra. edición revisada y ampliada, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid-Barcelona-México, España, 2005.
- YAZAR, A.: "Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions", *Agric. Water Manage*, 8: 439-449, 1984.