

ARTÍCULO ORIGINAL

Relación entre parámetros de uniformidad de riego en máquinas de pivote central

Relationship between irrigation uniformity parameters in center pivot machines

Ezequiel R. Jiménez Espinosa¹, Pedro González Baucells² & Miguel Domínguez González³

RESUMEN. El estudio se realizó en 16 pivotes de diferentes proveedores en las provincias Artemisa, Mayabeque y Matanzas, las cuales utilizaron emisores del tipo Spray Nelson D3000, Spray Senninger, Super Spray y Boquilla Difusora IIRD del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). El procedimiento de evaluación ejercido correspondió con la norma NC ISO 11545: 2005 para comparar el comportamiento de los pivotes. Se determinó el Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CU_h), Coeficiente de uniformidad de variación de Bremond y Molle (CU_v), Uniformidad de distribución ($UD_{25\%}$), y su relación gráfica con el Área Regada Adecuadamente (ARA), con el objetivo de valorar la uniformidad de riego. También se establecieron relaciones entre los parámetros antes mencionados y la velocidad del viento (V.V). Como resultado, en general se obtuvieron altos valores de CU_h , salvo en seis máquinas, que pudo estar asociado a la incorrecta distribución de boquillas. A pesar de existir alta asociación entre los parámetros de uniformidad de riego y el ARA, se impone estudiar la uniformidad por tramos para identificar en cuales zonas de la máquina hubo problemas en la distribución del agua. También se comprobó que no existe incidencia de la V.V en los parámetros ARA, CU_h , $UD_{25\%}$ y CU_v , coincidiendo con otros autores.

Palabras claves: coeficiente de uniformidad, uniformidad de distribución, pivote, boquillas difusoras.

ABSTRACT. The study was carried out in 16 irrigation machines of different foreign enterprises in the provinces Artemisa, Mayabeque and Matanzas of Cuba. The used emitters were Spray Nelson D3000, Spray Senninger, Super Spray and Spray IIRD of the Research Institute of Irrigation and Drainage, actually Research Institute of Agricultural Engineering (IAgric). The used standard to carry out the field test was NC ISO 11545: 2005. The parameters Coefficient of uniformity by Heermann and Hein (CU_h), Coefficient of uniformity of variation by Bremond and Molle (CU_v) and distribution Uniformity ($DU_{25\%}$) were determined, and their graphic relationship with the Area Watered Appropriately (AWA) with the objective of valuing the irrigation uniformity. Also, relationship between the parameters mentioned and the speed of the wind (S.W) were established. As a result, in general, high values of CU_h were obtained, except in six machines that it could be associated to the incorrect distribution of nozzles. Low association exists between the parameters of irrigation uniformity and the AWA, for what is imposed to study the uniformity for tracts (between towers) to see in that areas of the machines are problems in the distribution of the water. Was also obtained that incidence of the S.W in the parameters AWA, CU_h , $DU_{25\%}$, and CU_v , doesn't exist, coinciding with other authors.

Key words: coefficient of uniformity, distribution uniformity, pivot, spray.

INTRODUCCIÓN

Las máquinas de Pivote Central están entre los sistemas de riego más populares en el mundo. Ellas han hecho fácil y muy eficaz el riego en muchas áreas donde otros métodos de irrigación no son adecuados. Se pueden aplicar riegos más

frecuente y cubrir mejor los requerimientos de agua de los cultivos y aumentar al máximo la producción.

Durante las últimas tres décadas, las máquinas de pivote central se han perfeccionado mucho. Son mecánicamente muy fiables y simples de operar, aunque, como cualquier maquinaria, el mantenimiento rutinario y sistemático es

Recibido 17/03/11, aprobado 19/05/12, trabajo 34/12, artículo original.

¹ M. Sc. Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Ave. Camilo Cienfuegos y Calle 27, Arroyo Naranjo, La Habana, Cuba, Apdo. 6090. Telf: (537) (07)-691.2533. E-✉: esequiel@iagric.cu

² M. Sc. Especialista, Instituto de Proyectos Azucareros, La Habana, Cuba.

³ Dr. C., Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola.

imprescindible. Estos equipos permiten un notable ahorro de agua y energía al compararse con otras técnicas como la aspersión tradicional y los pivotes de accionamiento hidráulico (González, 2006).

En Cuba la expansión de esta técnica ha permitido estabilizar las grandes producciones de papa, viandas y hortalizas sobre los suelos de mejores condiciones desde el punto de vista agrícola.

Por otra parte Cárdenas (2000), plantea que la uniformidad de aplicación del riego es un parámetro que está muy relacionado con la eficiencia del riego y con la producción de los cultivos.

Por tanto, se están realizando inversiones importantes en temas de modernización de los sistemas de riego con la introducción de nuevas tecnologías, dentro de estas están incluidos los pivotes. Además existen diferentes firmas extranjeras que proveen estos equipos de tecnología moderna. Recientemente se han instalado en el país pivotes eléctricos de diferentes firmas comerciales que utilizan emisores de baja presión colocados en bajantes de polietileno sobre el follaje de los cultivos.

En Cuba se han realizado inversiones importantes en estas tecnologías. Las provincias La Habana y Matanzas son las que más pivotes tienen instalados en el país y por ende, son las de mayor aporte a la producción agrícola. En virtud de lo anterior se impone la necesidad de realizar estudios de la uniformidad de riego en estos equipos ya que son los que deciden la producción agrícola del país. El objetivo de este artículo es caracterizar la distribución de agua en las Máquinas de Pivote Central.

MÉTODOS

Se seleccionaron dos provincias por ser las más productivas del país. Se realizaron 16 ensayos de campo a máquinas de 6 municipios y de 4 marcas diferentes, con el objetivo de determinar la uniformidad de riego. La norma utilizada para los ensayos fue la NC ISO 11545 (2005). Dichas pruebas fueron efectuadas con emisores Spray Nelson D3000, Spray Senninger, Super Spray y boquilla difusora IIRD, esta última producida en Cuba. La altura respecto al suelo de los mismos osciló entre 0,9 y 1,2 m.

Los indicadores de uniformidad de riego que se determinaron fueron los siguientes:

Coefficiente de uniformidad por Heermann & Hein (1968):

$$CU_h = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |C_i - M_c|}{\sum_{i=1}^n C_i D_i} \right] \cdot 100 (\%)$$

donde:

n – número de colectores;

C_i - cantidad recogida por el colector (con i variando entre 1 y n);

D_i - área regada por el colector i o distancia del centro del pivote al colector i;

M_c - media ponderada de las cantidades recogidas por los n colectores.

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

Coefficiente de uniformidad de variación según Bremond & Molle (1995):

$$CU_v = \left[1 - \frac{1}{\frac{\sum C_i D_i}{D_i}} \cdot \sqrt{\frac{\sum \left(C_i - \frac{\sum C_i D_i}{\sum D_i} \right)^2 D_i}{\sum D_i}} \right] \cdot 100 (\%)$$

Uniformidad de distribución:

$$UD_{25\%} = \frac{\text{Lá min a media en el 25\% del área menos regada}}{\text{Lá min a media de toda el área}} \cdot 100 (\%)$$

Además se determinaron otros parámetros como:

- Área Regada Adecuadamente (ARA): basada en la lámina que está dentro del rango del 10% por encima y por debajo de la lámina media.
- Área Regada Excesivamente (ARE): basada en la lámina que está por encima del 110% de la lámina media.
- Área Regada Insuficientemente (ARI): basada en la lámina que está por debajo del 90% de la lámina media.

También se establecieron las relaciones gráficas entre el los siguientes indicadores:

- ARA-CU_h
- ARA-CU_v
- ARA-UD_{25%}
- CU_h-Velocidad del viento (V.V)
- CU_v-V.V
- UD_{25%}-V.V
- ARA-V.V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados de uniformidad del riego. Puede observarse la alta uniformidad de las máquinas equipadas con emisores rotator, salvo la evaluación 4 estuvo asociada a la inclinación de los bajantes. Lo mismo ocurrió con el resto de los bajantes en las evaluaciones 3, 10, 13, 15 y 16.

Los valores favorables de los parámetros de uniformidad para el rango de altura del emisor 0,9-1,2 m, confirman los criterios de otros autores. Cárdenas (2000) observó que aumentaba el CU_h a medida que disminuía la altura. El mismo autor obtuvo los mayores valores de este parámetro con los emisores ubicados a 1m de altura. Heinemann *et al.* (1997) y Tarjuelo (2005), plantean la reducción de la altura del emisor al suelo, para disminuir las pérdidas por evaporación y arrastre, sin perjudicar los parámetros de calidad de riego. Según Kincaid (1996), las boquillas difusoras debían estar al menos a 1m por encima del suelo. Sin embargo Montero *et al.* (1997) obtuvo un resultado diferente, o sea, que para las condiciones de España recomienda 2 m de altura.

Un elemento interesante son los porcentajes de Área Regada Adecuadamente (ARA), donde estos muestran, en algunos casos, contradicciones con los parámetros Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CU_h), Coeficiente de uniformidad de variación de Bremond y Molle (CU_v) y Uniformidad de distribución ($UD_{25\%}$), o sea, se reflejan valores significativamente diferentes de ARA para valores similares de CU_h , CU_v y $UD_{25\%}$.

Tabla 1. Relación de los datos de las diferentes marcas de máquinas evaluadas, así como sus parámetros de uniformidad de riego

No.	Lugar	Marca	Emisor	Altura (m)	V.V (m/s)	Área (ha)	AMR (mm)	UD (%)	CU_h (%)	CU_v (%)	SBR (%)	ARE (%)	ARA (%)	ARI (%)
1	Quivicán	Valley	Rotator	0,9-1,20	2,66	17,98	7,10	83,64	93,17	89,36	82,51	11,58	70,93	17,49
2	Güines	Agrocaja	Spray-S	0,9-1,20	2,50	57,55	8,87	74,85	87,64	81,60	78,08	24,66	53,42	21,92
3	Quivicán	Valley	IIRD	0,9-1,20	2,90	17,98	23,93	55,91	72,01	56,32	62,56	19,82	42,74	37,44
4	S. Antonio	Valley	Rotator	0,9-1,40	3,50	17,98	25,00	52,23	73,30	54,95	48,00	48,00	0,00	52,00
5	S. Antonio	Valley	Spray-S	0,9-1,20	3,00	35,26	22,10	79,36	84,71	80,55	71,62	29,47	42,21	28,31
6	S. Antonio	Valley	Spray-S	0,9-1,20	2,30	32,78	24,99	88,65	91,38	87,06	80,76	11,59	69,17	19,24
7	S. Antonio	Valley	Sprary-N	0,9-1,20	2,50	32,78	29,86	89,61	93,76	91,99	87,91	10,46	77,44	12,09
8	Güira	Valley	Rotator	0,9-1,20	3,00	55,08	18,32	84,35	88,46	84,60	82,29	28,79	53,50	17,71
9	Güines	Valley	Spray	0,9-1,20	4,50	32,73	18,85	76,94	86,22	82,77	77,52	15,86	61,66	22,48
10	Quivicán	Western	S. Spray	0,3-1,20	3,00	54,63	14,06	67,41	79,65	73,62	69,27	35,67	33,60	30,73
11	Güira	Uralita	S. Spray	1,2-1,8	2,50	32,98	13,80	69,89	83,02	61,87	73,30	16,82	56,48	25,92
12	C. Ávila	Western	Spray-N	0,9-1,20	3,00	49,76	6,65	78,72	86,65	82,59	74,02	29,34	44,68	25,92
13	C. Ávila	Western	Spray-N	0,9-1,20	2,00	49,76	11,30	61,29	77,93	71,16	71,16	45,67	16,09	38,24
14	Matanzas	Western	Spray-N	0,9-1,20	3,50	52,56	12,00	70,33	83,29	76,89	68,88	35,82	33,05	31,12
15	Matanzas	Western	Spray-N	0,9-1,20	0,50	34,21	9,29	53,05	73,29	64,38	56,72	35,74	20,98	43,98
16	Matanzas	Western	Spray-N	0,9-1,20	3,80	34,21	5,56	62,18	77,37	69,78	74,60	20,94	53,66	25,40

Símbolos: AMR- Altura Media Recogida; SBR- Superficie Bien Regada

En las relaciones gráficas de las Figuras 1A, 1B y 1C, se resalta la dispersión entre los puntos. El modelo lineal representado es el que más se ajusta y sin embargo es poco efectivo ya que los valores de coeficiente de determinación (R^2) son bajos. Aunque existe buena correlación entre los parámetros analizados (coeficientes de correlación por encima de 0,5), no significa que siempre que haya un parámetro de uniformidad de riego alto, el ARA es también alto o viceversa.

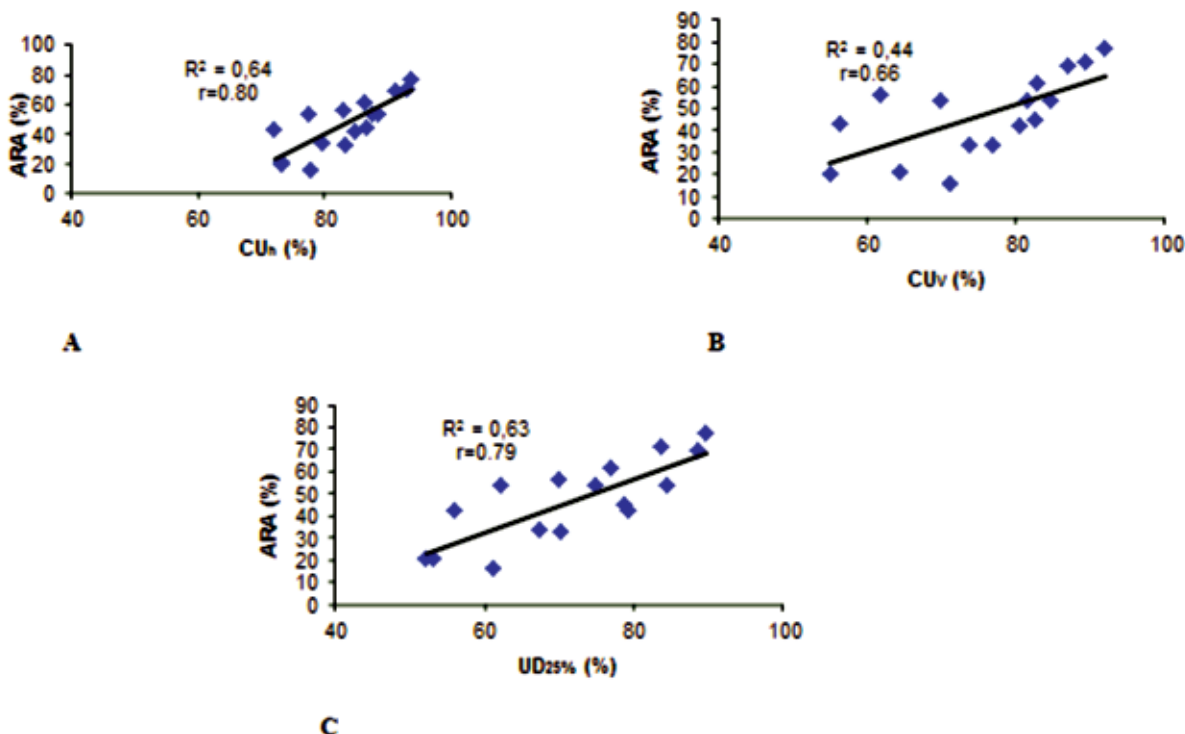


FIGURA 1. Relación de parámetros de uniformidad de riego. A: correlación entre el ARA y el CU_h , B: correlación entre el ARA y el CU_v y C: correlación entre el ARA y la $UD_{25\%}$.

Sin embargo, Jiménez (2008), obtuvo correlaciones considerablemente mayores al realizar este estudio excepto entre la relación ARA-UD_{25%}, debido a que este indicador representa el 25% de los valores más bajos, y precisamente estos no entran en el ARA. Entonces propuso los criterios de área regada utilizados por Tarjuelo (2005), utilizando el porcentaje de Área Regada Adecuadamente (Tabla 2).

TABLA 2. Criterios de área regada partiendo de porcentajes de ARA

Criterio de área regada según Tarjuelo (2005)	Porcentaje de área regada adecuadamente (ARA)
Área muy bien regada	Mayor al 66%
Área bien regada	Entre 57% y 66%
Área inadecuadamente regada	Menor del 57%

Fuente: Jiménez (2008)

Lo anterior está asociado a la distribución de la lámina a lo largo de la máquina. Si el tramo del lateral que está aplicando el agua con alta variabilidad, está cercano al pivote, el ARA será mayor, y mientras más alejado esté el tramo que distribuye mal el agua del pivote, será menor el ARA. Por tanto, se impone estudiar la uniformidad por tramos. Lo cual se coincide con el

autor de referencia, donde estableció la clasificación, considerando que la distribución de la lámina a lo largo de la máquina sea homogénea, o que las alteraciones en la distribución de agua se encuentren en los primeros tramos de la máquina.

También Tornés et al. (2009), realizó la uniformidad por tramos en un máquinas de pivote central y obtuvo zonas infraregadas (<0,85 de la Altura Media Recogida) en los últimos tramos y sin embargo Coeficientes de uniformidad elevados (>90%).

Se puede resumir que el Coeficiente de Uniformidad no debe ser el indicador que rija la calidad de distribución de agua en la máquina de riego de pivote central, sino el porcentaje de Área Regada Adecuadamente.

Para fundamentar más, lo planteado anteriormente, en la Figura 2 se muestra un ejemplo de las distribuciones de la lámina de riego respecto a la distancia al pivote (2A) y a la superficie (2B), en una máquina marca Valley en el municipio de Quivicán. Referido a la Tabla 1, los valores de CU_h y ARA son altos, o sea, 93,17% y 70,93% respectivamente. Esto es debido a que las alteraciones de distribución de la norma de riego se encuentran en los primeros tramos de la máquina (Figura 2A), y por consiguiente, analizando la Figura 2B, el área que representa dentro del área total no es considerable. Por tanto, hay correspondencia entre esos dos parámetros.

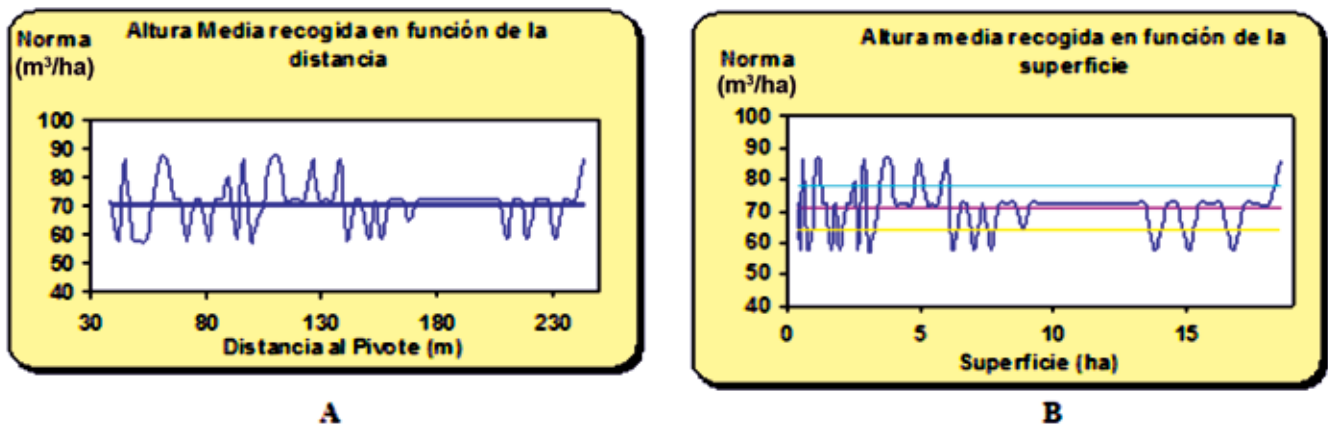


FIGURA 2. Distribución de la lámina de riego de la máquina Valley, municipio Quivicán (evaluación 1). A: relación norma-distancia; B: relación norma-superficie.

Respecto a la incidencia de la velocidad del viento en los parámetros de uniformidad de riego, la Figura 3 refleja gran dispersión entre los puntos, o sea, que la velocidad del viento no determina la calidad de la distribución de agua a lo largo de una máquina de pivote central y así lo demuestra los bajos valores de coeficiente de correlación. Lo anterior concuerda con Tarjuelo (2005) que plantea que no se ha encontrado claras diferencias en la uniformidad de reparto de agua por el factor velocidad y dirección del viento. También coincide con González (2006) donde no obtuvo relación entre estos parámetros.

CONCLUSIONES

- En sentido general se obtuvieron satisfactorios valores de coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein, Coeficiente de uniformidad de variación y Uniformidad de distribución para los diferentes tipos de emisores estudiados.
- Aunque se encontraron dependencias del porcentaje de Área Regada Adecuadamente con los parámetros de uniformidad de riego, no significa que siempre ocurra así, ya que no es lo mismo presentar problemas de distribución de la lámina de

- riego al principio de la máquina, que al final de la misma, porque representan áreas diferentes. Por tanto, se impone analizar la uniformidad del reparto de agua por tramos.
- El coeficiente de uniformidad no debe ser el parámetro que determine si el área está bien regada o no, sino el porcentaje de Área Regada Adecuadamente.
- El criterio de área mal, regular y bien regada, para una máquina de pivote central, se puede establecer teniendo en cuenta el criterio del porcentaje de Área Regada Adecuadamente, partiendo del hecho de que la distribución de

la lámina a lo largo de la máquina sea uniforme o que las alteraciones en la distribución de agua se encuentren en los primeros tramos de la máquina.

- No existe incidencia alguna de la velocidad el viento sobre los parámetros Área Regada Adecuadamente, Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein, Coeficiente de uniformidad de variación y Uniformidad de distribución.

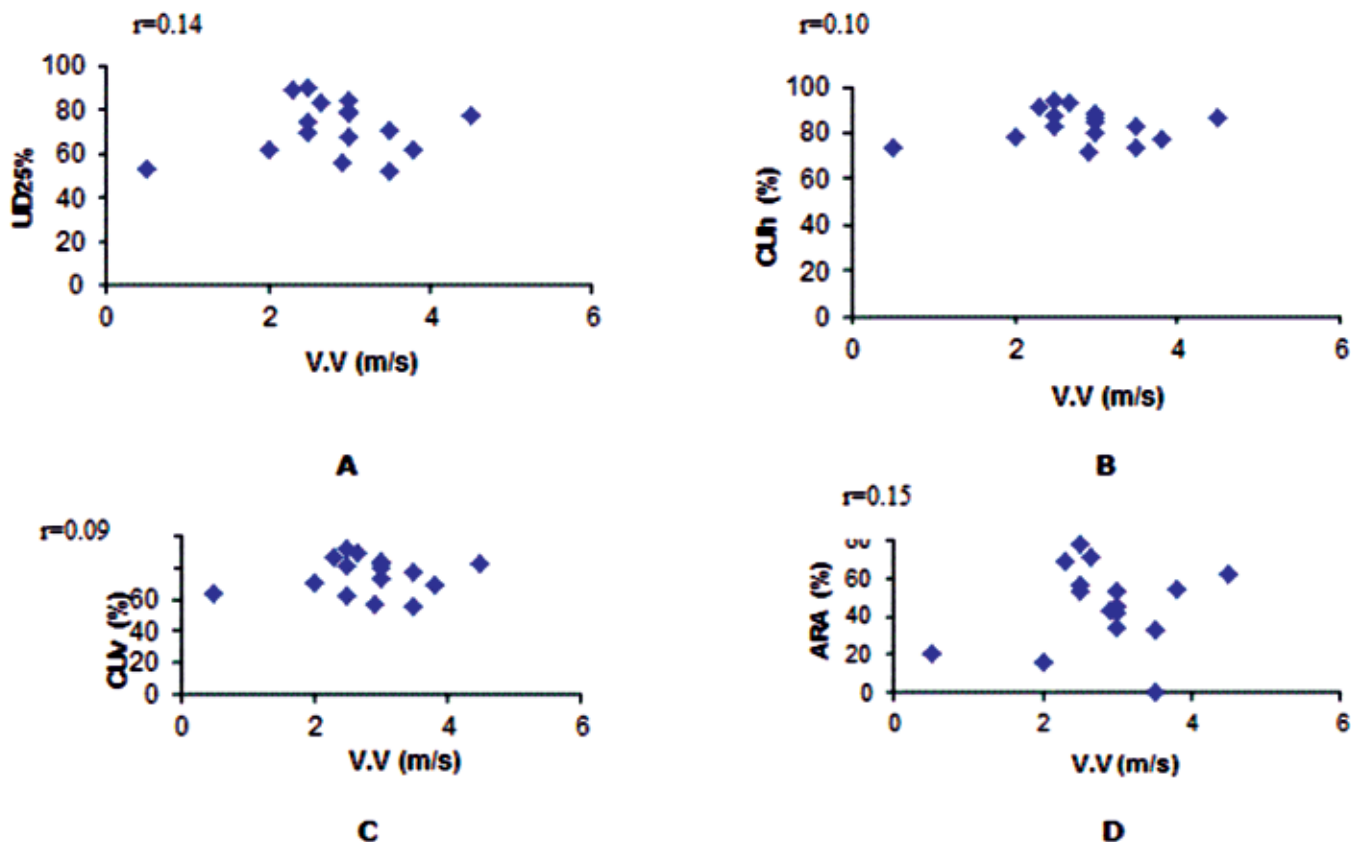


FIGURA 3. Correlación entre parámetros de uniformidad de riego. A: correlación entre $UD_{25\%}$ y la V.V, B: correlación entre el CU_h y la V.V, C: correlación entre el CU_v y la V.V, y D: correlación entre el ARA y la V.V.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BREMOND, B. & B. MOLLE: "Characterization of rainfall under center pivot: influence of measuring procedure", *Journal of Irrigation and Drainage Engineer*, 121(5): 347-353, 1995.
2. CÁRDENAS, J. F.: *Estudio del uso de la boquilla difusora cubana en las máquinas de riego de pivote central*, 76pp., Tesis (en opción al título de Master en Riego y Drenaje), Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, La Habana, 2000.
3. GONZÁLEZ, P.: *Mejoramiento del uso y explotación de los difusores de baja presión y bajantes, en las máquinas de riego por aspersión*, Informe final, Proyecto 22-18, IIRD, La Habana, 2006.
4. HEERMANN, D. F. & P.R. HEIN: "Performance characteristics of self-propped center pivot sprinkler irrigation system", *Transactions of the ASAE*, 11(1): 11-15, 1968.
5. HEINEMANN, B. A.; A. FRIZZONE; M. PINTO & C. FEITOSA: Influencia da Altura do Emissor na Uniformidade de Distribuição da Água de um Pivô Central, relatório de investigação, UFV, Viçosa, Brasil, 1997.
6. JIMÉNEZ, E.R.: *Seguridad técnica, índices de explotación y eficacia de la máquina Otech-Irrimec para enfrentar los huracanes, en caso de que ocurran los mismos*, Informe del Proyecto 22-35, Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, La Habana, 2008.
7. KINCAID, D. C.: "Sprinkler Pattern Analysis for Centre Pivot Irrigation", *Business and Technology*, 4(4): 14-15, 1996.
8. MONTERO, J.; J. M. TARJUELO; J.L. TEBAR; F. LOZANO y FT. HONRUBIA: Análisis de la distribución de agua en riegos con equipos pivote. En: *Congreso nacional de riegos 15*, 1997, pp. 481-490, Lleida, Cataluña, España, 1997.
9. NC ISO 11545:2005. *Máquinas agrícolas para riego—pivotes centrales y máquinas de avance frontal equipadas con boquillas difusoras o aspersores—determinación de la uniformidad de distribución del agua*, Vig. 2005.
10. TARJUELO, J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, 569pp., 3 ed., Editora Mundi-Prensa, Madrid, España, 2005.
11. TORNÉS, N. O.; O. PUJOL; M. GÓMEZ; T. BOICET y G. CINTRA: "Evaluación de la calidad del riego en máquinas eléctricas de pivote central del modelo o tipo Ballama", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(1): 59-63, 2009.