

El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos: aplicación a dos cultivos

Change of sprinkler irrigation kit in pivots based on economic criteria: Application for two crops

Dr.C. Ramón Pérez Leira¹, Est. Yamilé Sabatier Corrales¹¹

¹Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) extensión Chone, Ecuador.

¹¹ Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Facultad de Ingeniería Civil, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN. En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo teórico para la determinación del momento óptimo de sustituir el módulo de reguladores de presión y emisores de un pivote. El modelo parte del criterio de que el desgaste en los reguladores de presión y en las boquillas incide en la disminución de la Uniformidad del Riego y este último en la pérdida de rendimientos. Se consideran en el modelo: los costos por consumo adicional de agua y de energía, de mantenimiento y de mano de obra, así como las pérdidas de rendimiento asociadas a las zonas con riego insuficiente y con riego excesivo en los cultivos de la papa y el maíz. La suma de todos estos componentes es comparada con el costo de la adquisición y montaje de un nuevo módulo de aspersión, lo cual le permite al agricultor decidir el momento propicio para hacer la sustitución a partir de criterios económicos.

Palabras clave: pivote de riego, emisores, costos, eficiente, papa, maíz.

ABSTRACT. This paper presents a theoretical model for determining the optimal moment to replace the kit of sprinkler irrigation and pressure regulators in a pivot. The model is based that the wear on the pressure regulators and nozzles affects the decrease Irrigation Uniformity and this causes the yield loss. In the model are considered: the costs for additional consumption of water and energy, maintenance and labor, and yield losses associated with areas with insufficient irrigation and over irrigation for potato and corn. The sum of all these components is compared with the cost of purchase and installation of a new sprinkler module, which allows the farmer to decide the right moment to make substitutions based on economic criteria.

Keywords: pivot irrigation, spray, costs, efficient, potato, corn.

INTRODUCCIÓN

Después que a inicios de los años 50 se comenzara la fabricación seriada de los primeros modelos de Pivotes para el riego en los Estados Unidos, la agricultura en el mundo comenzó a transitar por una revolución tecnológica solo comprable con la sustitución de la tracción animal por el tractor (Schaefer, 2014). La fácil automatización, el bajo requerimiento de fuerza laboral y la posibilidad de utilizar bajas presiones han sido las razones principales que han permitido la rápida extensión del riego con estas máquinas en todo el mundo (Lyle y Butler, 1980, Bordousky *et al.*, 1992 y Tarjuelo, 2005).

En Cuba se introducen los primeros pivotes “Fregat” (de tracción hidráulica) en 1977, procedentes de la antigua Unión

Soviética, y muy pronto fue una técnica aceptada por los productores y generalizada en todo el país. La evolución de los dispositivos de aspersión ha transitado desde los aspersores de impacto colocados sobre la tubería hasta las boquillas difusoras y otros dispositivos giratorios colocados con bajantes y reguladores de presión hasta alturas muy próximas al suelo con lo cual se consiguen mayores uniformidades y eficiencias en el uso del agua. Estos dispositivos tienen una vida útil que puede llegar hasta las 6000 horas de uso (Ribeiro, 2001)¹. Evaldo *et al.* (2001), determinaron que el Coeficiente de Uniformidad y la dosis de riego disminuyen después que el módulo de aspersión ha sido utilizado por más de seis años. A partir de estas experiencias

¹ RIBEIRO, V.L.S.C.: Avaliação Hidráulica de Válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização, 90pp., Dissertação submetida à coordenação do curso de pós-graduação em agronomia-irrigação e drenagem como requisito parcial para obtenção do grau de mestre. Universidade Federal de Ceará. Brasil, 2001.

Pérez *et al.* (2011a), elaboraron un modelo matemático que permite determinar el momento óptimo para el cambio del módulo de aspersión en los pivotes a partir de las condiciones específicas de Brasil y que posteriormente evaluaron para un caso de estudio con los cultivos de papa y frijol (Pérez *et al.*, 2011b).

Sin embargo, no se encuentran estudios en Cuba enfocados a este tipo de análisis a pesar de la demostrada reducción que provoca en los orificios y conductos del pivote las incrustaciones del carbonato de calcio presente en el agua. Hasta la fecha no se responde sobre un criterio económico sólido ¿Hasta cuándo es rentable mantener el módulo de aspersión en un pivote después de haber acumulado miles de horas de uso?

Pérez *et al.* (2014), proponen un modelo teórico a partir de las experiencias precedentes con el objetivo de definir los criterios y variables a considerar para determinar el momento óptimo de cambiar el módulo de reguladores de presión y emisores en un pivote en las condiciones específicas de Cuba. Este trabajo representa la continuidad a ese estudio y se desarrolla con el objetivo de aplicar el modelo propuesto y evaluar sus resultados para dos cultivos de interés nacional (papa y maíz).

MÉTODOS

Descripción de los parámetros técnico-operacionales del pivote y régimen de riego de proyecto

Para la ejecución de este trabajo se partió de la definición de los parámetros técnico-operacionales de la máquina de pivote central (Tabla 1).

TABLA 1. Parámetros técnico-operacionales del pivote

Longitud (m)	350,00
Área (ha)	38,47
Caudal (L/s)	45,48
Presión (m)	31,95
Potencia requerida (kW)	36,40
Dosis de riego mínima (m ³ /ha)	33,00
Dosis de riego máxima (m ³ /ha)	329,00
Tiempo mínimo de riego (h)	7,76
Tiempo máximo de riego (h)	85,29

El régimen de riego de proyecto para los cultivos de la papa y el maíz se definió a partir del cálculo realizado por Pérez *et al.* (2009). Un resumen del mismo para los dos cultivos se ofrece en la Tabla 2.

TABLA 2. Resumen del régimen de riego de proyecto para los dos cultivos en el año

Cultivo	Norma Parcial Neta (m ³ /ha)	Cantidad de riegos
Papa	180	20
Maíz	299	8

Simulaciones de la distribución del riego del pivote para diferentes uniformidades

La simulación se realizó a partir de una programación en Excel en la cual se obtuvo la lámina de riego aplicada a todo lo largo del pivote. Para cada una de las simulaciones se calculó el Coeficiente de Uniformidad de Heerman y Hein (CU_H) según establece la norma NC ISO 11545 (2007). El decremento del CU_H analizado estuvo en el intervalo de 93,44% (para la condición del módulo nuevo) hasta 83,44% (para la peor condición de riego asociada a un mayor deterioro del módulo de aspersión). Como compensación a estos deterioros de la uniformidad del riego se consideraron incrementos del tiempo de riego (ITR) de 5%, 10% y 15%.

Cálculo de los costos variables para las diferentes uniformidades de riego

El comportamiento de cada uno de los costos variables asociados a cada incremento de tiempo de riego se determinó a partir de las expresiones definidas por Pérez *et al.* (2014) y que se resumen a continuación:

Costo por consumo adicional de energía (CCAЕ)

$$CCAЕ = \left\{ \left[1.02 \cdot \left[\left(\frac{Q \cdot Ht}{102 \cdot Efb \cdot Efm} \right) + \frac{Pmaq}{EFmrr} \right] \right] \cdot H \cdot (ITr - 1) \right\} \cdot Tarifa \vec{Eléctrica} \quad (1)$$

donde:

CCAЕ = Costo por consumo adicional de energía eléctrica consumida (peso);

Q: Caudal a la entrada del pivote (L/s);

Ht: Carga dinámica total (m);

Efb: Eficiencia de la bomba (decimal);

Efm: Eficiencia del motor (decimal);

Pmaq: Potencia demandada por la máquina (kW);

Efmrr: Eficiencia del motorreductor (Efmrr = 0,85);

H: Tiempo de riego (h);

ITr: Incremento del Tiempo de riego (decimales).

Tarifa eléctrica = Consumo día (6 am – 5 pm), 0.063 peso/kW·h, consumo madrugada (10 pm – 6 am), 0.035 peso/kw·h según la resolución 311 del Ministerio de Finanzas y Precios (MFP, 2000)².

² MFP. Ministerio de Finanzas y Precios. Resolución 311. LA Habana, Cuba, 2000.

Costo por consumo adicional de agua (CCAA)

$$CCAA = Q \cdot \sum_{\text{días regados} = 1}^a \{H * (ITr - 1)\} \cdot Pa \quad (2)$$

donde:

Q: Caudal de bombeo requerido por el pivote (m³/h)
 Pa: Precio o tarifa de agua de 0.0025 peso/m³ de agua subterránea bombeada según la Resolución 421-2012 emitida por el MFP (2012)³ y vigente a partir de enero de 2013.

Costo por consumo adicional de mano de obra (CCAMO)

$$CCAMO = \sum_{\text{días regados} = 1}^a \{S * H (ITr - 1)\} \quad (3)$$

donde:

S = Salario por hora (1.43 peso/hora) según Pérez *et al.* (2009).

Costo adicional por mantenimiento (CAMT)

$$CAMT = CMKv - CMKn \quad (4)$$

donde:

CAMT: Costo anual de mantenimiento (peso);
 CMKv: Costo de mantenimiento con el módulo viejo (peso);
 CMKn: Costo de mantenimiento con el módulo nuevo (peso).

Cálculo del costo por pérdidas de rendimiento

Para el cálculo del costo por pérdidas de rendimiento (CPR) asociadas a la reducción de la uniformidad del riego se partió de las ecuaciones de consumo de agua-rendimiento para cada cultivo (González, 2013)⁴; que se muestran a continuación:

Para la papa:

$$R = -0,00033 I^2 + 0,2 I \quad (5)$$

Para el maíz:

$$R = -0,000098 I^2 + 0,046 I \quad (6)$$

donde:

R: Rendimiento (t/ha);
 I: Agua aplicada por riego (mm).

La dosis de riego simulada para cada condición de uniformidad de riego fue replicada por el número de riegos requeridos según el régimen de riego de proyecto y evaluada en la ecuación de rendimiento de cada cultivo. El valor de rendimiento obtenido para cada área se multiplicó por su extensión en hectáreas para obtener la producción y luego por el precio de venta del cultivo para obtener el valor de la producción. Las áreas regadas se clasificaron en tres grupos según lo definieron Montero *et al.* (1997)⁵: Área Regada Adecuadamente (ARA) definida como aquella donde el cultivo recibe entre el 85% y el 115% de la dosis de riego requerida, Área Regada Insuficientemente (ARI), definida como el área donde el cultivo recibe menos del 85% de la dosis de riego requerida y Área Regada Excesivamente (ARE), la correspondiente a la extensión donde el cultivo recibe más del 115% de la dosis de riego requerida.

El precio de venta de los productos se tomó según lo regulado por MFP (2013)⁶ y mostrado en la Tabla 3.

TABLA 3. Precios de compra por entidades estatales acopiadoras en sus establecimientos centralizados según resolución 366-2013 del Ministerio de Finanzas y Precios para el año 2014

Cultivos	Precio (peso/quintal)
Papa	49.8
Maíz seco (en grano)	286

RESULTADOS Y DISCUSION

Determinación de los costos variables

Un resumen de los costos y sus incrementos asociados al incremento del tiempo de riego se puede apreciar en la Tabla 4. La mayor magnitud de las pérdidas está estimada en la reducción de los ingresos de la producción seguida por el consumo de energía y los costos de mantenimiento.

TABLA 4. Comportamiento de los costos variables y otros indicadores para tres valores de ITR

No.	Indicadores (pesos)	Módulo nuevo	ITR 5%	ITR 10%	ITR 15%
1	Costo por consumo de energía	59 035.27	62 001.81	64 968.35	67 911.59
2	Incremento del costo del consumo de energía		2 966.54	5 933.07	8 876.31
3	Costo por consumo de agua	635.67	667.46	699.24	731.03
4	Incremento del costo del consumo de agua		31.78	63.57	95.35
5	Costo de mano de obra	2 224.36	2 336.08	2 447.80	2 558.09
6	Incremento del costo de mano de obra		111.72	223.44	333.73

³ MFP. Ministerio de Finanzas y Precios. Resolución 421/2012. La Habana, Cuba, 2012.

⁴ GONZÁLEZ ROBAINA, F.: FUNCIONES Agua-Rendimiento para Cultivos de importancia Agrícola en Cuba. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias), Ministerio de la Agricultura., Instituto de Investigaciones Fundamentales “Alejandro de Humboldt” La Habana, Cuba, 2013.

⁵ MONTERO, J.; TARJUELO, J.M.(P); TÉBAR, J.I.; LOZANO, F. Y HONRUBIA, F.T.: Análisis de la distribución de agua en riegos con equipos pivot. XV Congreso Nacional de Riegos, Lérida. 481-490, 1997.

⁶ MFP. Ministerio de Finanzas y Precios. Resolución 366/2013. La Habana, Cuba, 2013.

No.	Indicadores (pesos)	Módulo nuevo	ITR 5%	ITR 10%	ITR 15%
7	Costo por mantenimiento	2 768.03	2 906.43	3 044.83	3 183.23
8	Incremento del costo por mantenimiento		138.40	276.80	415.20
9	Ingresos por producción	2 582 804.42	2 575 484.53	2 569 260.97	2 556 021.39
10	Decremento de los ingresos de producción		7 319.89	13 543.46	26 783.03
11	Total costos variables (1+3+5+7)	64 663.34	67 911.78	71 160.22	74 383.93
12	Total costos variables (S/ha)	1 386.25	1 455.89	1 525.52	1 594.63
13	Total de pérdidas (2+4+6+8+10)		10 568.33	20 040.34	36 503.62
14	Total de pérdidas (S/ha)		274.61	520.74	948.53

El comportamiento de estos costos ha sido mostrado en gráficos para los diferentes valores de ITR y expresado en peso/ha con el objetivo de que puedan ser utilizados para condiciones análogas en pivotes con otras longitudes, más allá de este caso particular. Se presenta además la ecuación de mejor ajuste para cada tipo de costo en su relación con el ITR (Figuras 1, 2, 3 y 4).

Comportamiento del costo por consumo adicional de energía (CCA E)

El incremento del costo por consumo de energía para cada valor de ITR se puede apreciar en la Figura 1.

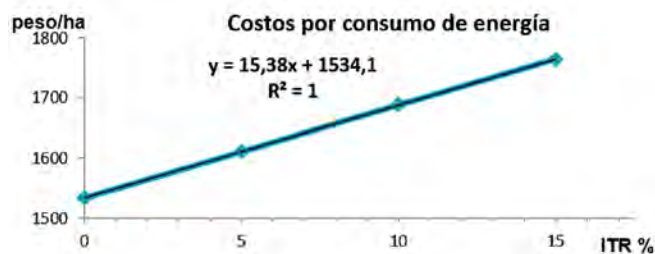


FIGURA 1. Tendencia de los costos por consumo de energía para diferentes valores de ITR.

Dicho incremento mostró una tendencia lineal descrita por la ecuación de mejor ajuste $Y = 15,38 X + 1534,1$ donde $Y =$ Costo de energía consumida (peso/ha) y $X =$ ITR (%).

Comportamiento del costo por consumo adicional de agua (CCA A)

El comportamiento de estos costos mostró una tendencia lineal descrita por la ecuación de mejor ajuste $Y = 0,1652 X + 16,521$ donde $Y =$ Costo del agua consumida (peso/ha) y $X =$ ITR (%). Esta tendencia se puede apreciar en la Figura 2.

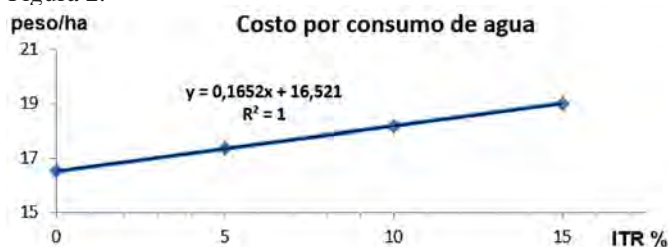


FIGURA 2. Tendencia de los costos por consumo de agua para diferentes valores de ITR.

Comportamiento del costo por consumo adicional de mano de obra (CCAMO)

El comportamiento de estos costos mostró también una tendencia lineal descrita por la ecuación de mejor ajuste $Y = 0,5784 X + 57,806$ donde $Y =$ Costo de mano de obra (peso/ha) y $X =$ ITR (%). Esta tendencia se puede apreciar en la Figura 3.



FIGURA 3. Tendencia de los costos de mano de obra para diferentes valores de ITR.

Comportamiento del costo adicional por mantenimiento (CAMT)

El comportamiento de estos costos mostró también una tendencia lineal descrita por la ecuación de mejor ajuste $Y = 0,7193 X + 71,926$ donde $Y =$ Costo de mantenimiento (peso/ha) y $X =$ ITR (%). Esta tendencia se puede apreciar en la Figura 4.



FIGURA 4. Tendencia de los costos de mantenimiento para diferentes valores de ITR.

Cálculo del costo por pérdidas de rendimiento

Los valores de lámina total aplicada a cada cultivo fueron evaluados en sus ecuaciones de rendimiento correspondientes.

Como se puede apreciar en la Figura 5 existe un punto a partir del cual para mayores aplicaciones de dosis de riego el rendimiento de los dos cultivos comienza a disminuir. Esta condición ocurre para la papa con valores a partir de los 298,5 mm y para el maíz a partir de los 234,5 mm.

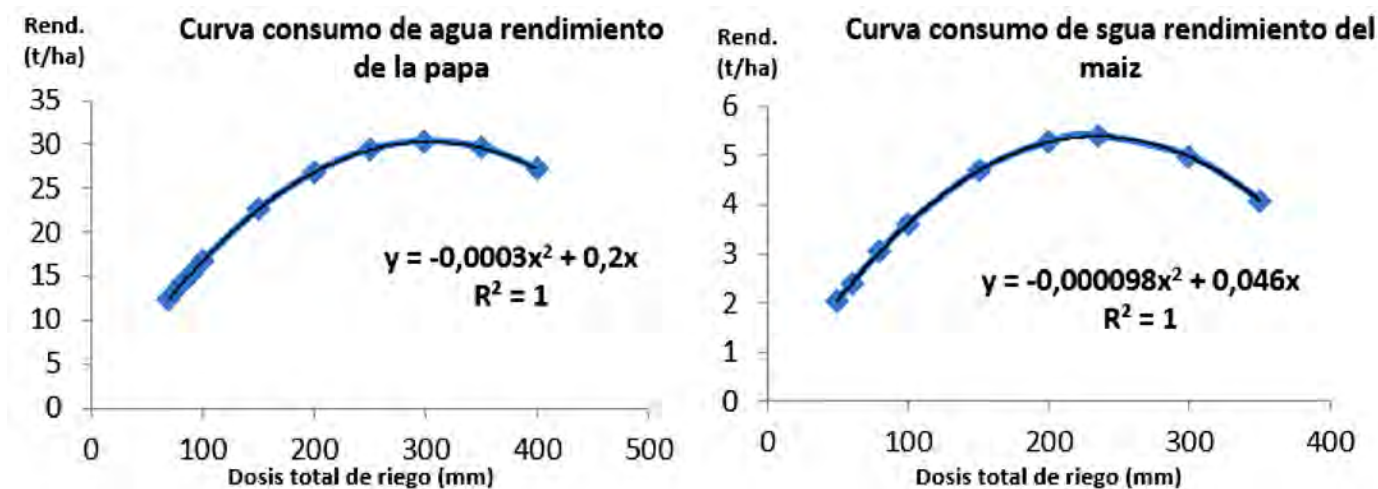


FIGURA 5. Curva consumo de agua-rendimiento para los cultivos de la papa y el maíz.

Una vez calculado el rendimiento y las pérdidas asociadas al riego excesivo o deficitario se determinaron las pérdidas totales (considera los dos cultivos) en pesos para cada valor de ITR. El comportamiento de estas pérdidas por hectárea mostró una tendencia polinómica de segundo grado descrita por la ecuación de mejor ajuste $Y = 3,646 X^2 + 22,349X + 210,79$ donde $Y =$ Pérdidas de rendimiento (peso/ha) y $X =$ ITR (%). Esta tendencia se puede apreciar en la Figura 6.



FIGURA 6. Tendencia de las pérdidas totales de rendimiento para diferentes valores de ITR.

La Figura 7 resume la tendencia resultante de las pérdidas totales expresadas en peso/ha para diferentes valores de ITR. Esta resultante surge de la suma de los consumos adicionales de energía, mantenimiento, mano de obra y agua, al cual se le adicionan las pérdidas totales de rendimiento de los dos cultivos.



FIGURA 7. Tendencia de las pérdidas totales para diferentes valores de ITR.

La utilidad práctica de esta figura y de la ecuación que describe el comportamiento de las pérdidas totales radica en que, una vez conocido el precio de adquisición y montaje de un módulo nuevo de aspersión expresado en peso/ha, permite definir cuál es el límite de ITR a partir del cual las pérdidas totales son superiores al precio de adquisición y montaje de un módulo nuevo. Cuando el valor de las pérdidas totales es superior al de implementar un módulo de aspersión nuevo, ya no se justifica económicamente aplicar riegos con dosis superiores a las requeridas por el cultivo para compensar los problemas de mala uniformidad del riego.

CONCLUSIONES

- El modelo propuesto para definir el momento óptimo para el cambio del módulo de aspersión en los pivotes a partir de un criterio económico se pudo aplicar para los cultivos de la papa y el maíz.
- Los resultados obtenidos para cada uno de los componentes de los costos variables así como de la pérdida de rendimiento de los cultivos asociados a diferentes incrementos del tiempo y dosis de riego, demuestran de forma cuantitativa el costo de regar por encima de la dosis requerida para compensar los problemas de uniformidad asociados al deterioro del módulo de aspersión.
- Por orden de magnitud las mayores pérdidas están estimada en la reducción de los ingresos de la producción seguida por el consumo de energía y los costos de mantenimiento.
- La aplicación de la ecuación que describe el comportamiento de las pérdidas totales permite definir cuál es el límite de ITR a partir del cual ya no se justifica económicamente aplicar riegos con dosis superiores a las requeridas por el cultivo para compensar los problemas de mala uniformidad del riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORDOUSKY, J.P.; LYLE W.M.; LASCANO R.J. & UPCHURCH D.R.: "Cotton Irrigation Management with LEPA systems", *Transaction of the ASABE*: ISSN: 0001-2351, 35 (3): 879-884, 1992.
- EVALDO, K. A.; DE CASTRO S. R. & DUROHA, C.: "Evaluation Center Pivot Systems using new and old sprays and pressure regulators", *IRRIGA. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*. ISSN: 1808-8546, E-ISSN: 1808-8546, 6 (1): 73-78, 2001.
- LYLE, P. & BUTLER G.: Low energy labor from Texas pivot. *Irrigation Farmer*: 7 (4): 4-10, 1980.
- NC ISO 11545: *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*. (ISO 11545:2001, IDT), Vig. junio 2007.
- PÉREZ, L. R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M & FRIZZONE, J.A.: "Optimal Moment to Change Pressure Regulator and Sprayer Kit on Center Pivot Irrigation Machines: A Theoretical Proposal", *IRRIGA. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*. ISSN: 1808-8546, E-ISSN: 1808-8546, 16, (4): 436-449, 2011a.
- PÉREZ, L. R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M & FRIZZONE, J.A.: "Optimal Moment to Change Pressure Regulator and Sprayer Kit on Center Pivot Irrigation Machines: Application to a Study Case". *IRRIGA. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*. ISSN: 1808-8546, E-ISSN: 1808-8546, 16 (4): 450-458, 2011b.
- PÉREZ, L. R.; BERMÚDEZ H., C. y VALDÉZ M, A.L.: Costos de operación en los sistemas de riego mecanizado de pivote central. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, ISSN: 1680-0338, XXX (3): 51-60, 2009.
- PÉREZ, L. R.; DOMÍNGUEZ, G. J. y PANEQUE, R. P.: Metodología para el cambio del módulo de aspersión en los pivotes a partir de un criterio económico para Cuba: Modelo teórico. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 24 (3): 22-27, 2015.
- SCHAEFER, B.: *History of irrigation*, [en línea] 2012, Disponible en: <http://spudman.com/index.php/magazine/article/global-rainmakers-spudman-looks-back-on-the-history-of-irrigation-manufacture> [Consulta: 17 de marzo de 2014].
- TARJUELO, J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, Ed. Ediciones Mundi Prensa, vol. 3a edición, ISBN: 84-8476-225-4, Madrid, Barcelona, México, 2005. y

Recibido: 29/03/2014.

Aprobado: 23/07/2015.

Publicado: 07/09/2015.

Ramón Pérez Leira, Docente-Investigador, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) extensión Chone, Ecuador, Correo electrónico: rperezleira@gmail.com

Yamilé Sabatier Corrales, ISPJAE, Correo electrónico: rperezleira@gmail.com

