

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Recalibración regional de Hargreaves (HE y K_{RS}) en México

Regional recalibration of Hargreaves (HE and K_{RS}) in Mexico

Dr. Henry Arturo Kelso Bucio^I, Dr. Khalidou Mamadou Bâ^{II}, M.C. Francisco Magaña Hernández^{III}, Dr. S. Sánchez Morález^{III},
Dr. Delfino Reyes López^{IV}

^I Productos Agropecuarios KEBU, S.A., vía interamericana, Juay, San Félix, Chiriquí, Panamá.

^{II} Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria, C. P. 50110, Toluca, Estado de México, México.

^{III} Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campus Ixtacuaco, Tlapacoyan, México.

^{IV} Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Agrohidráulica, San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México.

RESUMEN. En este estudio se realizó una recalibración del exponente de Hargreaves (HE) y el coeficiente (K_{RS}), para mejorar la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante el método de Hargreaves (HG). El método de HG fue seleccionado debido a que requiere un mínimo de variables climatológicas, mismas que se encuentran disponibles en la mayoría de las estaciones meteorológicas. El objetivo de este estudio fue recalibrar el exponente HE y el coeficiente K_{RS} en México, para definir el mejor parámetro de recalibración regional del método, a través de la implementación de la base de datos meteorológicos de la Red Nacional de Modelaje y Sensores Remotos (LNMySR) del INIFAP periodo 2005-2012. La comparación de los métodos fue realizada mediante el error cuadrático medio, desviación estándar del error e índice de correspondencia. Los resultados indican una mejora significativa en la estimación ETo a intervalos diarios en la recalibración de HE y K_{RS} , además de reducir la sobrestimación o subestimación producida por HG, con un 97% de SEE inferior a 1.0 mm d⁻¹ con respecto al método de Penman Monteith y el mejor parámetro para recalibrar HG es el coeficiente K_{RS} , ya que tiene mayor utilidad al ser requerido para estimar la radiación solar.

Palabras clave: Penman Monteith, evapotranspiración de referencia, exponente de Hargreaves, coeficiente de Hargreaves.

ABSTRACT. A recalibration was made of the Hargreaves exponent (HE) and the coefficient (K_{RS}), to improve the estimation of the reference evapo-transpiration using the Hargreaves method (HG). The HG method was selected because it requires a minimum of climatological variables, which are available in most of the meteorological stations. The objective of this study was to recalibrate the exponent HE and the coefficient K_{RS} in Mexico, to define the best parameter of regional recalibration of the method, by means of the implementation of the meteorological data base of the National Network of Modeling and Remote Sensors (LNMySR) of the INIFAP, period 2005-2012. The comparison of the methods was made using mean square error, standard deviation of the error and correspondence index. Results indicate a significant improvement in the ETo estimation at daily intervals in the recalibration of HE and K_{RS} , in addition to reducing the overestimation or underestimation produced by HG, with 97% of SEE lower than 1.0 mm d⁻¹ with respect to the method of Penman Monteith, and the best parameter to recalibrate HG is the coefficient K_{RS} , given that it has greater usefulness when required for estimating solar radiation.

Keywords: Penman-Monteith, reference evapotranspiration, Hargreaves exponent, Hargreaves coefficient.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración de referencia (ETo), es un término compuesto por la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. La estimación de ETo es de gran importancia en los estudios hidrológicos, en los balances hídricos, programación

de riego, planificación agrícola e hídrica, etc.

La evapotranspiración de referencia (ETo) se puede estimar mediante métodos directos e indirectos. Estos métodos van desde las ecuaciones de balance de energía complejas que

requieren un mayor número de variables climatológicas hasta las ecuaciones simples que utilizan un mínimo de variables meteorológicas (Hargreaves y Samani, 1985). Actualmente, el método de mayor precisión para estimar ETo es la ecuación de Penman Monteith (PM) (Allen *et al.*, 1998).

La estimación de la ETo mediante PM, requiere de la disponibilidad de diferentes variables climatológicas que no se encuentran disponibles con facilidad en México y en la mayoría de las zonas de nuestro interés. Sin embargo, cuando se presenta esta limitante, se recomienda el uso del método de Hargreaves y Samani (HG) para la predicción de ETo, el cual sólo requiere variables de temperatura máxima y mínima, usualmente disponibles en las estaciones meteorológicas (Allen *et al.*, 1998; Campos, 2005). La ecuación HG proporciona estimaciones confiables para intervalos de tiempo semanal o mensual y los resultados de estimación pueden ser mejorados haciendo ajustes regionales a sus coeficientes para reducir la sobreestimación o subestimación que presenta HG a intervalos de tiempo más cortos (Hargreaves, 1989; Jensen *et al.*, 1997; Droogers y Allen, 2002; Hargreaves y Allen, 2003, Kelso *et al.*, 2012).

La recalibración puede ser realizada al exponente empírico (HE), al de temperatura (HT) o al de Hargreaves ($HC = 0.0135 * KRS$). Analizando la utilidad de estos exponentes y coeficientes, el coeficiente KRS que forma parte de HC, puede ser utiliza-

do para estimar la radiación solar a partir de la diferencia de temperaturas cuando no se cuenta con la medición de dichas variables (Hargreaves y Samani, 1982; Almorox y Hontoria, 2003; Chineke, 2007; Bandyopadhyay *et al.*, 2008).

Sin embargo, debido a la importancia de contar con métodos alternos para estimar ETo, la presente investigación tuvo como objetivo recalibrar el exponente HE y el coeficiente K_{RS} de la ecuación de Hargreaves en las principales zonas agrícolas de México, así como comparar los métodos de Hargreaves, Hargreaves corregido mediante su exponente HE (HG_{HE}) y Hargreaves corregido mediante su coeficiente (HG_{KRS}) para mejorar la precisión de ETo con base a PM.

MÉTODOS

La calibración del exponente HE y del coeficiente K_{RS} se desarrolló de manera regional por estación, a intervalos de 24 horas para obtener una mayor precisión en la estimación de ETo y así poder evaluar HG en la escala temporal más pequeña recomendada. Los datos meteorológicos requeridos, temperaturas máximas y mínimas y evapotranspiración, fueron los de la Red Nacional de Modelaje y Sensores Remotos (LNMySR) del INIFAP periodo 2005-2012. Las estaciones consideradas fueron 541 estaciones de 29 estados de la República Mexicana (Figura 1).

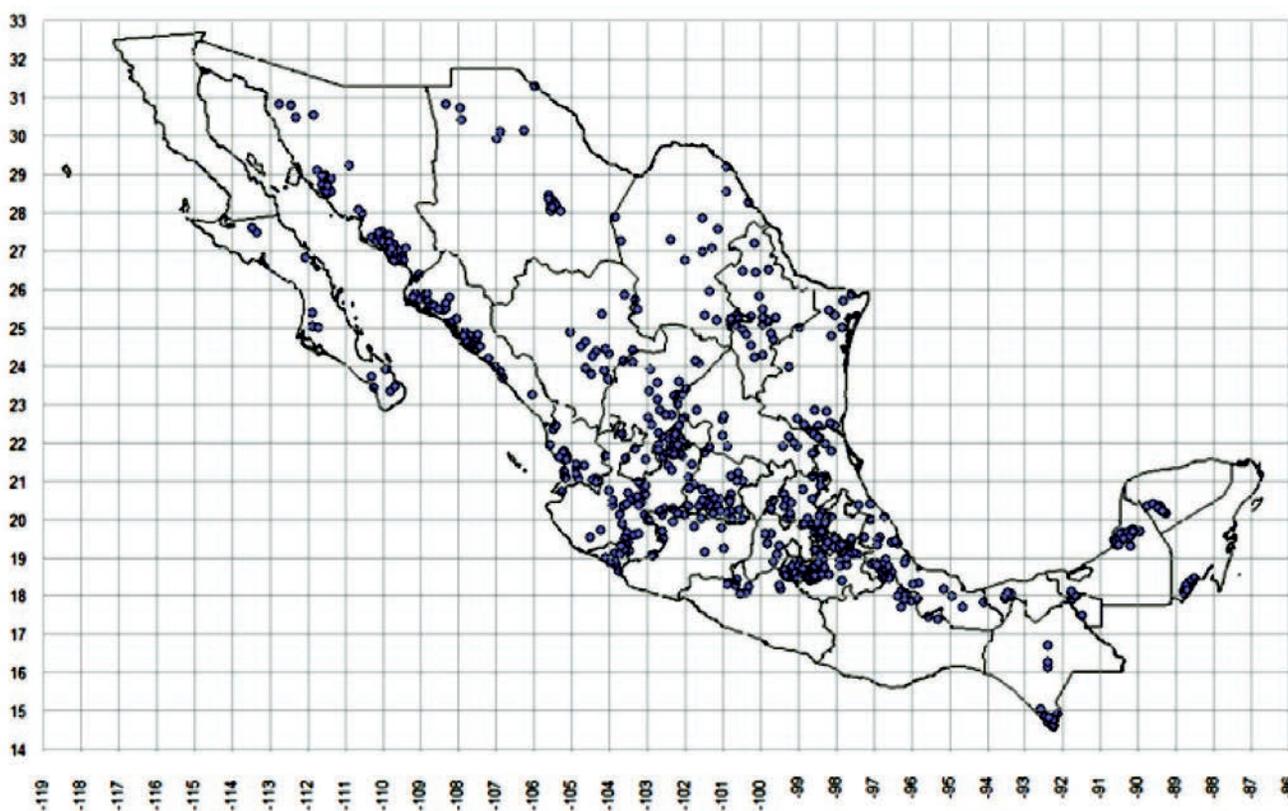


FIGURA 1. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Método de Penman Monteith

El método de referencia utilizado para comparar los resultados de HG, HG_{HE} y HG_{KRS} fue PM, el cual es considerado como el método para estimar ETo y recomendado por la FAO para comparar los diferentes métodos empíricos.

Método de Hargreaves

Cuando la información climatológica es limitada y no se puede usar PM, se recomienda el método de Hargreaves y Samani (HG) para predecir ETo, el cual sólo requiere datos de temperatura máxima y mínima, usualmente disponibles en las estaciones meteorológicas (Allen *et al.*, 1998; Campos, 2005). El método de HG (Hargreaves y Samani, 1985), puede ser expresado de la siguiente forma:

$$HG = 0.0135 \cdot K_{RS} \cdot R_a \cdot \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + HT \right) \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{HE} \quad (1)$$

donde, HG es la evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹); K_{RS} es la relación entre la fracción de radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra y la diferencia de temperatura (0,17); R_a es la radiación extraterrestre (mm d⁻¹); T_{max} es la temperatura máxima diaria (°C); T_{min} es la temperatura mínima diaria (°C); HT coeficiente empírico de temperatura (17,8); HE exponente empírico de Hargreaves (0,5).

Recalibración del exponente HE

La recalibración de HE se obtuvo mediante la igualdad de términos entre PM y HG propuesta por Trajkovic (2007) y expresada por Kelso *et al.*, 2012:

$$HE = \frac{\log \left[\frac{PM}{0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right)} \right]}{\log [T_{\max} - T_{\min}]} \quad (2)$$

Recalibración del coeficiente K_{RS}

La recalibración de K_{RS}, se llevó a cabo mediante la ecuación 3 que proviene de la ecuación 1. El coeficiente K_{RS}, puede ser utilizado en la estimación de la radiación solar (Hargreaves y Samani, 1982).

$$K_{RS} = \frac{HG}{0.0135 \cdot R_a \cdot \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + HT \right) \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{HE}} \quad (3)$$

Evaluación de parámetros

Una vez obtenido el exponente HE y el coeficiente K_{RS} recalibrados por estación, se estimaron HG_{HE} y HG_{KRS} a intervalos diarios, y se evaluó el rendimiento en la predicción de ETo con los criterios de comparación del error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar del error (SEE), índice de correspondencia (D) y el cociente entre ambas estimaciones promedio de ETo (\bar{r}) (Willmott, 1982):

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (PM^i - HG_{HE}^i)^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad (5)$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right]^{0.5} \quad (6)$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{P}}{\bar{O}} \quad (7)$$

donde, P_i es el valor estimado con cada modelo de prueba; O_i es el valor estimado con PM; \bar{P} es el promedio de los valores estimados para cada modelo de prueba; \bar{O} es el promedio de los valores estimados con PM; y n es el tamaño de la muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recalibración

Los resultados de la recalibración del exponente HE y coeficiente K_{RS}, se observan de forma espacial para el 50% del

territorio mexicano en la Figura (2a y 2b), respectivamente. El 40% de las estaciones contempladas requieren de una recalibración del orden de HE (0.26 - 0.45), K_{RS} (0.091 - 0.152) ó HC (0.0012 - 0.0021), donde el clima cálido representó el 66.8%, clima árido 28.1% y clima templado 4.6%. El 41.4% de las estaciones requieren de una recalibración del orden de 0.46 - 0.5, 0.148 - 0.186 ó 0.002 - 0.0025 con respecto a HE, K_{RS} y HC, donde el clima cálido representó el 42.2%, clima árido 45.5% y clima templado 12.5%. Finalmente el 18.6% de las estaciones requieren de una recalibración del orden de HE (0.51 - 0.56), K_{RS} (0.168 - 0.205) ó HC (0.0023 - 0.0028), donde el clima cálido representó el 13.9%, clima árido 70.3% y clima templado 15.8%.

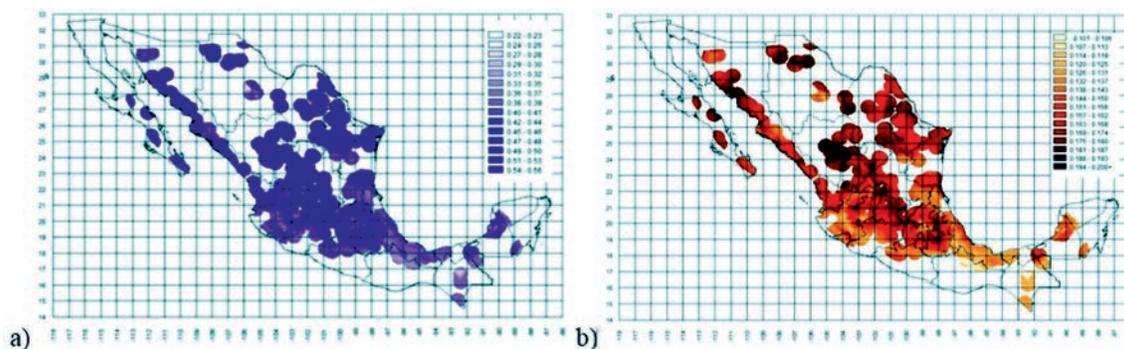


FIGURA 2. Distribución espacial de la recalibración del exponente HE (2a) y coeficiente K_{RS} (2b).

También se observa que existe una relación entre la amplitud térmica, K_{RS} , altitud y HE (Hargreaves *et al.*, 2003 y Kelso *et al.*, 2012). Sin embargo, se estimó que existe una relación entre la amplitud térmica, altitud, latitud y longitud como variables predictoras para el exponente HE de un $r^2 = 0.692$ y para el coeficiente K_{RS} de un $r^2 = 0.733$.

Algunos autores han considerado calibrar HG mediante el coeficiente HC en mayor proporción que HE ó K_{RS} . Sin embargo, al realizar una recalibración regional propiamente dicha de estos parámetros, se han obtenido buenos resultados y se presenta una alternativa en la estimación de ETo de forma confiable en la zona de estudio. Trajkovic (2007) comparó los métodos de PM y HG corregido por su exponente HE en el sureste de Europa en la región de Western Balkan, proponiendo un HE = 0.424 para esta región, donde se sobreestimaron los valores de ETo en las zonas húmedas con respecto a PM. Kelso *et al.*, (2012) realizó una calibración del exponente HE en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz en México, donde la ecuación de HG sobreestimó los valores de ETo en regiones de clima cálido húmedo y cálido subhúmedo. Xu y Singh (2001) proponen un HC = 0.0028, para clima frío en la zona de Canadá. Martínez-Cob y Tejero-Juste (2004) sugirió la implementación de un HC = 0.002, en regiones semiáridas y velocidad del viento del orden a $< 2 \text{ ms}^{-1}$. Bautista *et al.*, (2009) realizó una calibración mensual de HC en Yucatán México, donde propone un HC mensual para clima subhúmedo tropical del orden de 0.0021 - 0.0024 y para clima semiárido de la costa 0.0024 - 0.0026. Tabari y Hosseinzadeh (2011) efectuaron una calibración de Hargreaves en regiones de clima árido y frío de Irán, donde proponen valores de HC = 0.0031 para clima árido y 0.0028 para clima frío. Tomando en cuenta las diferentes investigaciones y comparadas con los resultados obtenidos, no siempre resultarán similares

los valores recalibrados de HE, K_{RS} ó HC con el tipo de clima de la zona de estudio, ya que un aumento de elevación no siempre resulta en una disminución de los coeficientes de recalibración. Sin embargo, se observa que en las zonas tropicales donde predominan los climas cálidos, la ecuación de Hargreaves requiere de una recalibración para reducir la sobrestimación de ETo y en las zonas donde predomina el clima árido la ecuación de Hargreaves subestima ETo, de acuerdo a las estaciones analizadas en México.

Por lo tanto, una alternativa para mejorar la estimación de ETo mediante HG consiste en la recalibración regional del método utilizando valores meteorológicos locales como sugiere Trajkovic (2007).

CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la escasez de datos climatológicos disponibles, se requiere de métodos alternos para estimar ETo de manera confiable y con datos limitados. Debido a esto se propone una recalibración regional de la ecuación de Hargreaves mediante su coeficiente K_{RS} y mediante su exponente HE. Ambas modificaciones a la ecuación, disminuyen significativamente la sobrestimación y aumentan la precisión en la predicción de la ETo. De acuerdo a los resultados obtenidos, no se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre ambos criterios de recalibración. Sin embargo, el mejor parámetro para recalibrar, es el coeficiente K_{RS} debido a que minimiza el error asociado con la estimación de la radiación solar, por lo tanto, mejora la estimación de ETo al igual que HE, sin embargo el coeficiente K_{RS} puede ser utilizado para la estimación de la radiación solar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G., L. PEREIRA S., D. RAES, & M. SMITH: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy. 298 p., 1998.
- ALMOROX, J., & C. HONTORIA: "Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain". Energy Conversion & Management, ISSN: 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.022> 45: 1529 - 1535, 2003.

- BANDYOPADHYAY, A., A. BHADRA., N. RAGHUWANSHI, R. SINGH.: "Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extreme", Agricultural and Forest Meteorology, ISSN: 0168-1923, 148: 1707 – 1718, 2008.
- BAUTISTA, F., D. BAUTISTA, & D. CARRANZA.: "Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications", *Atmósfera*, ISSN 0187-6236, <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902013000300005>, 22 (4): 331-348, 2009.
- CAMPOS, D., F.: "Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana", *Ingeniería hidráulica en México*, ISSN: 0186-4076, 20 (3):99-110, 2005.
- CHINEKE, T. C.: "Equation for estimating global solar radiation in data sparse regions", *Renewable Energy*, ISSN: 0960-1481, DOI: 10.1016/j.renene.2007.01.018, 33: 827 - 831, 2008.
- DROOGERS, P., & R. ALLEN.: "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions", *Irrig. Drain Syst.*, ISSN: 0168-6291 (print version) ISSN: 1573-0654 (electronic version), 16 (1): 33-45, 2002.
- HARGREAVES, G., H., AND A. SAMANI Z.: "Estimating potential evapotranspiration", *J. Irrig. Drain. Div.*, ISSN: 0044-7978, 108: 225-230, 1982.
- HARGREAVES, G., H., & R. ALLEN G.: "History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation", *J. Irrig. Drain Eng.*, eISSN: 1943-4774, ISSN: 0733-9437. DOI: (ASCE)0733-9437 (2003),129 (1): 53-63, 2003.
- HARGREAVES, G., H., & Z. SAMANI A.: "Reference crop evapotranspiration from temperature", *Appl. Eng. Agric.*, ISSN: 0883-8542. OCLC. 12258667, 1 (2): 96-99, 1985.
- HARGREAVES, G., H.: "Accuracy of estimated reference crop evapotranspiration", *J. Irrig. Drain Eng.*, e-ISSN: 1943-4774, ISSN: 0733-9437. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\),120:6\(1132\):1994](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994),120:6(1132):1994).
- JENSEN, D. T., G. HARGREAVES H., B. TEMESGEN, & R. ALLEN G.: "Computation of ETo under nonideal conditions", *J. Irrig. Drain Eng.*, eISSN: 1943-4774, ISSN: 0733-9437. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437), 123 (5): 349-400, 1997.
- KELSO, B., H., A., K. M. BÀ, S. SÁNCHEZ M., y D. REYES L.: "Calibración del exponente de la ecuación Hargreaves-ETo en los estados de Chiapas, Oaxaca y Veracruz, México", *Agrociencias*, ISSN: 1405-3195, 46 (3): 221-229, 2012.
- MARTINEZ-COB, A., & TEJERO-JUSTE, M.: "A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semi-arid regions", *Agric. Water Manage.*, ISSN: 0378-3774, 64 (3), 251-264, 2004.
- TABARI, H., AND P. HOSSEINZADEH: "Local of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model", *J. Hydrol. Eng.*, ISSN: 1084-0699, 16 (10): 837-845, 2011.
- TRAJKOVIC, S.: "Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions", *J. Irrig. Drain Eng.*, ISSN: 0733-9437, 133 (1): 38-42, 2007.
- WILLMOTT, C., J.: "Some comments on the evaluation of model performance", *Bull. Am. Meteorol. Soc. AMS.*, Online ISSN: 1520-0477, 63, 1309-1313, 1982.
- XU, C. Y., & V. SINGH: "Evaluation and generalization of temperature-based equations for calculating evaporation", *Hydrol. Processes*, ISSN: 0885-6087, [doi/10.1002/hyp.119/pdf](http://dx.doi.org/10.1002/hyp.119/pdf), 15 (2): 305-319, 2001.

Recibido: 31 de octubre de 2013.

Aprobado: 10 de julio de 2014.

Publicado: 24 de octubre 2014

Henry Arturo Kelso Bucio, Productos Agropecuarios KEBU, S.A., Vía Interamericana, Juay, San Félix, Chiriquí, Panamá,

Correo electrónico: henry.iah@gmail.com



**Instituto de Investigaciones
de Ingeniería Agrícola**



DATOS DE LOCALIZACIÓN DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA AGRÍCOLA (IAgric)

Sede Boyeros:

Dirección General y Económica. Dirección: Carretera de Fontanar, km 2½, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: IAgricdireccion@minag.cu; direccion.general@iagric.cu Teléfonos: (53) (7) 645-1731; 645-1353.

Sede Arroyo Naranjo:

Direcciones Científica y de Desarrollo Institucional, Unidad de Producciones Tecnológicas y Comercial. Dirección: Avenida Camilo Cienfuegos y Calle 27, Municipio Arroyo Naranjo, Apartado Postal 6090, Habana 6, Cuba. E-mail: directoradajunta@iagric.cu Teléfonos: (53) (7) 691 2533/ 691 2665 Telefax: (53) (7) 691 7595/ 691 1038.